

AGUIRRE, JORGE FEDER
Viabilidad de wimax

2013

73221

73221



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIABILIDAD DE WIMAX PARA SOPORTE DE COMUNICACIONES
EN UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE.**

Por

Ing. Jorge Federico Aguirre

**Tesis presentada para la obtención del grado de Magíster en
Ciencias de la Ingeniería**

12287

Diciembre 2013

73221

73221

MFN:
Clasif:
T. 003

VIABILIDAD DE WIMAX PARA SOPORTE DE COMUNICACIONES EN UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE



por

Ing. Jorge Federico AGUIRRE



Dr. Fernando MAGNAGO
Director

Aprobada por:



Dr. Gustavo GONZALEZ
Jurado de Tesis



Dr. Juan Carlos AMATTI
Jurado de Tesis



Mgter. Fernando CORTEGGIANO
Jurado de Tesis



Dr. Ing Leonardo MOLISANI
Secretario de Posgrado de la FI-UNRC



M.Sc. Jorge BARRAL
Secretario de Posgrado y Cooperación
Internacional de la UNRC

Diciembre 2013

A Dios,
a mis Padres y Hermana,
a mis Abuelos, a mi amor,
a mi familia y a mis amigos,
por acompañarme
de una forma u otra
en este camino.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de numerosas personas a quien quiero agradecer con sincero afecto.

A mi director y consejero académico de este trabajo, Fernando, por su constante e incondicional apoyo y orientación.

A Rita Amieva quien siempre estuvo a total disposición y desinteresadamente ayudó a corregir este trabajo y además me enseñó a redactarlo.

A quienes me acompañaron a lo largo de este camino e hicieron interesantes aportes a este trabajo: David Deyong, Rodrigo Prat, Eduardo Toledo, George Gross, Ezequiel Tardivo, Pablo Solivella, Carlos Barrigon y Diego Fusari.

Al GASEP, en especial a Luis Aromataris, Juan Alemany, Ricardo Lima y Carlos Massei, por los momentos compartidos en este periodo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), porque hicieron posible este trabajo gracias a las becas y cargos otorgados.

INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del Problema	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Metodología utilizada.....	3
1.4. Estructura de la Tesis	3
CAPÍTULO II: RED ELÉCTRICA INTELIGENTE. SMART GRID	5
2.1. Introducción.....	5
2.2 Evolución de la red eléctrica: necesidad de una Red más eficiente.....	6
2.3. Necesidad de la convergencia Teleco-Eléctrica	9
2.4. Smart Grid	9
2.4.1. Modelo Conceptual	10
2.4.2. Objetivos de la SG	13
2.4.3. Agentes presentes en una SG.....	14
2.5. Normalización.....	14
2.5.1 Ámbito Internacional.....	14
2.5.2 Ámbito Nacional.....	16
2.6. Conclusiones.....	17
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID	19
3.1. Introducción.....	19
3.2. Diseño de una SG.....	19
3.3 Infraestructura Avanzada de Medición en una SG	20

3.4. Arquitectura de comunicaciones para una SG.....	23
3.5. Requisitos de comunicaciones para el diseño de una SG.....	25
3.5.1. Fiabilidad, robustez y disponibilidad	25
3.5.2. Escalabilidad	26
3.5.3. Calidad de servicios	26
3.5.4. Seguridad.....	27
3.6. Métricas para la planificación y evaluación de una infraestructura de comunicaciones en una SG	27
3.6.1. Capacidad máxima de transmisión	28
3.6.2. Latencia	28
3.6.3. Cobertura y Confiabilidad	28
3.6.4. Perfil de tráfico y datos	29
3.6.5. Esquemas de Acceso	30
3.7. Comunicaciones Inalámbricas en una SG.....	31
3.8. Conclusiones.....	31
CAPÍTULO IV: TECNOLOGÍAS Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID	32
4.1. Introducción.....	32
4.2. Tecnologías de comunicación disponibles.....	34
4.2.1. ZigBee	35
4.2.2. Redes Inalámbricas Malladas	35
4.2.3. Redes Celulares.....	36
4.2.4. Digital Subscriber Line (DSL).....	38
4.2.5. Power Line Carrier (PLC)	39
4.2.6. Fibra Óptica	39
4.3. Protocolos de comunicación para una SG.....	41

4.3.1. Protocolos para Home Area Network (HAN)	42
4.3.2. Automatización de edificios	43
4.3.3. Automatización de Subestaciones Eléctricas.....	43
4.3.4. Nivel de aplicación de sistemas de gestión energética.....	43
4.3.5. Lectura Remota de medidores	44
4.3.6. Protocolos de Control e Interoperabilidad en las Comunicaciones	44
4.3.7. Vehículo Eléctrico.....	45
4.3.8. Seguridad en las comunicaciones	45
4.4. Conclusiones.....	46
CAPÍTULO V: WIMAX COMO SOPORTE DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID. WiGRID.....	48
5.1. Introducción.....	48
5.2. Tecnologías Inalámbricas de 4ta Generación.....	49
5.3. Definición de un modelo de referencia para WiMAX.....	51
5.4. Capa Física (PHY)	52
5.4.1. Conceptos básicos OFDM	52
5.4.2. Parámetros OFDM en WiMAX.....	54
5.4.3. Sub-canalización: OFDMA	55
5.4.4. Slots y Estructura de una Trama WiMAX	55
5.4.5. Adaptive Modulation and Coding (AMC)	57
5.5. Capa de Acceso al Medio (MAC).....	57
5.5.1. Mecanismos de Acceso	58
5.5.2. Calidad de Servicio (QoS).....	59
5.5.3. Funciones de Seguridad.....	60
5.5.4. Funciones avanzadas.....	60

5.6. WiGRID	61
5.6.1. WiGRID-1	62
5.6.2. WiGRID-2	64
5.6.3. Implementaciones Pilotos.....	64
5.7. Conclusiones.....	65
CAPÍTULO VI: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PERFORMANCES DE UNA WiGRID. ESTUDIO PARA ZONAS RURALES	67
6.1. Introducción.....	67
6.2. Metodología.....	68
6.3. Estudio para despliegue en zonas de baja densidad poblacional	69
6.3.1. Modelo de enlace para una infraestructura de medición avanzada.....	69
6.3.2. BER/BLER para diversos esquemas de codificación y modulación en una SG	70
6.3.3. Eficiencia Espectral.....	72
6.3.4. Estudio de throughput para el nivel de enlace	74
6.4. Conclusiones.....	80
CAPÍTULO VII: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PERFORMANCES DE UNA WiGRID. ESTUDIO PARA ZONAS URBANAS	83
7.1. Introducción.....	83
7.2. Topología de Red. Consideraciones de Implementación.....	84
7.2.1. Modelado del Clúster de Celdas	84
7.2.2. Modelo de Interferencia	85
7.2.3. Modelo de Reúso de Frecuencias	85
7.2.4. Parámetros de configuración de la Red.....	86
7.3. Modelos de simulación de sistemas WiMAX	87
7.4. Estudio de Cobertura.....	90
7.4.1. Consideraciones en la determinación de umbrales de SNR para esquemas AMC.	90

7.5. Capacidad del sistema	93
7.6. Latencia del Sistema	95
7.7. Planificación de una Smart City utilizando una WiGRID mallada entre las BS.....	97
7.8. Conclusiones.....	101
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y APORTES REALIZADOS	103
8.1. Conclusiones.....	103
8.2. Trabajos Futuros	104
8.3. Aportes realizados.....	104
REFERENCIAS	107
ANEXO I: MODELADO DE CANALES INALÁMBRICOS	115

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. Coste medio por hora tras un corte del suministro eléctrico	7
TABLA 3.1. Caracterización de los mensajes a transmitir	29
TABLA 4.1: Tecnologías de comunicaciones para una Red Inteligente.....	41
TABLA 4.2. Protocolos de comunicaciones para una Red Inteligente.....	46
TABLA 5.1 – Tecnologías 4G disponibles en el mercado	50
TABLA 5.2. Parámetros de la capa Física de WiMAX – OFDM.....	54
TABLA 5.3. Latencias para una WiGRID-1.....	63
TABLA 6.1.Link-Level vs System-Level Simulation.....	68
TABLA 6.2. SNR y Eficiencia Espectral con $r=1/2$	72
TABLA 6.3. SNR y Eficiencia Espectral con $r=3/4$	73
TABLA 6.4. Parámetros de configuración	76
TABLA 6.5. Bit por símbolo transmitido	76
TABLA 6.6. Cálculo de Throughputs	79
TABLA 7.1. Configuración de Red.....	86
TABLA 7.2. Parámetros de configuración para cada BS	87
TABLA 7.3. Parámetros de configuración para cada SS.....	87
TABLA 7.4. Parámetros de configuración generales para cada SM.....	90
TABLA 7.5. Mapeo de CQI- SNR requerida.....	91
TABLA 7.6. Especificaciones técnicas y consideraciones del canal	99
TABLA 7.7. Resultados computados	100

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo energético actual.....	8
Figura 2.2. Modelo energético para una Smart Grid.....	10
Figura 2.3. Modelo NIST [14].....	11
Figura 2.4. Modelo de Interoperabilidad [14].....	12
Figura 3.1. Modelo multicapa propuesto por Sonoma Innovation.....	20
Figura 3.2. Aplicaciones en una SG.....	21
Figura 3.3. Arquitectura de una red de datos para la SG.....	23
Figura 3.4. Comparación de modelos.....	24
Figura 4.1. Tecnologías disponibles para la SG.....	32
Figura 5.1. Modelo de referencia de WiMAX.....	51
Figura 5.2. Esquema Multi-Portadora.....	53
Figura 5.3. Sistema OFDM.....	53
Figura 5.4. Estructura de una trama WiMAX-OFDMA [45].....	56
Figura 5.5. Trama de gestión de la capa MAC. [48].....	58
Figura 5.6. Arquitectura general de comunicación utilizando WiMAX.....	62
Figura 6.1. Celda WiMax.....	70
Figura 6.2. (a) Comparación BER para una modulación BPSK. (b) Comparación BER para una modulación QPSK.....	71
Figura 6.3. (a) Comparación BER para una modulación 16QAM. (b) Comparación BER para una modulación 64QAM.....	71
Figura 6.4. Eficiencia Espectral, $r = 1/2$	73
Figura 6.5. Eficiencia Espectral, $r = 3/4$	74
Figura 6.6. Distancia de cobertura vs modulación, para una celda WiGRID.....	74

Figura 6.7. Tiempo de símbolo OFDM.....	75
Figura 7.1. Modelo de simulación.....	83
Figura 7.2. Modelo para el estudio “System-Level Simulation” [83].....	84
Figura 7.3. Distintas configuraciones de clústeres [83]	86
Figura 7.4. BLER vs SNR para un canal AWGN	90
Figura 7.5. Cobertura de celdas en función del CQICH percibido.	92
Figura 7.5. Efecto del agregado del Shadow fading.....	92
Figura 7.7. Proceso de simulación para el cálculo de capacidad	93
Figura 7.8. Throughput promedio alcanzado después de 10 TTIs	94
Figura 7.9. Despliegue de 19 celdas.....	94
Figura 7.10. Throughput promedio experimentado por los SM.....	95
Figura 7.11. Comparación de latencias	97
Figura 7.12. Arquitectura de una WMN multi- radio.....	98
Figura 7.13. Ubicación de los nodos	98
Figura 7.14. Backhaul Mesh con acceso a través del AP4.....	100

Resumen

La demanda de energía eléctrica aumenta día a día mientras que los métodos vigentes de producción de la misma no son sostenibles, principalmente por razones de escasez de recursos y problemas de contaminación ambiental asociados. En este contexto, la implementación de una Red Inteligente (SG, *Smart Grid*) permitirá una gestión más eficiente de la energía, potenciando la bi-direccionalidad del sistema eléctrico, para que los consumidores puedan ser a la vez productores de electricidad y, de esta forma, introducir sus excedentes de energía eléctrica en la red. Así, las nuevas Tecnologías de Comunicación e Informática juegan un rol fundamental en la gestión y el control de la red.

Este trabajo indica la importancia de las redes de comunicaciones como soporte para el despliegue de una SG, proponiendo y evaluando a “WiMAX” como una tecnología de banda ancha inalámbrica de 4G capaz de satisfacer con todos los requisitos que una SG posee. En esta tesis se estudian e implementan diversos modelos de simulación logrando demostrar la factibilidad de esta solución.

La elección de esta tecnología se fundamenta en el uso masivo que las infraestructuras de comunicaciones móviles tienen en el mundo, y dado que varias empresas prestadoras de este tipo de servicio están migrando a soluciones 4G (principalmente por su robustez, flexibilidad y alta capacidad de transmisión de datos), se cree conveniente evaluar su uso en este nuevo escenario.

Abstract

The demand for electricity is increasing in a daily basis while the current methods of producing electricity are not sustainable, mainly due to lack of resources and environmental pollution problems associated with these methodologies. In this context, the implementation of a Smart Grid (SG) will allow better energy management, improving the bi - directionality of the electrical system; therefore, consumers can become electricity producers by offering their surplus power to the network. Thus, the new Communication and Information Technologies play a fundamental role in the management and control of the network.

This work indicates the importance of communications networks as the support for the deployment of a SG, proposing and evaluating WiMAX as a broadband wireless technology for 4G able to meet all requirements that SG requires. In this thesis, it is studied and implemented several simulation models and demonstrates the feasibility of this methodology.

The choice of this technology is based on the massive use of mobile communications infrastructures world wise and takes into account that several companies that provide this type of service are migrating to 4G solutions (mainly for its robustness, flexibility and high capacity of data transmission), it is concluded that it is highly important to evaluate their use in this new scenario.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema.

En la actualidad, el mercado de suministro de energía eléctrica se enfrenta a una situación cada vez más crítica, debido a que la demanda crece a un ritmo mayor que el de la infraestructura de las empresas proveedoras; lo que hace que la calidad de entrega de energía se vea disminuida, a tal punto que ya se observa una gran variedad de fallas y cortes en el suministro de electricidad en horarios de demanda pico [1].

Construir más plantas de generación convencionales (basadas en combustibles fósiles o radioactivos) no representa una solución viable al problema. Esto se debe principalmente a los elevados costos de infraestructura necesarios para la construcción y operación del sistema, además de los problemas ambientales por incremento en la producción de gases tóxicos liberados durante el proceso de generación. Por otro lado las actuales formas de generación

La solución debe provenir entonces de una gestión más eficiente de la red, optimizando el consumo y suministro de energía eléctrica, que facilite la incorporación de nuevas fuentes de generación a la matriz energética actual. Todo parece indicar que la tendencia actual converge a lo que se denomina “Red Inteligente” (SG, *Smart Grid*) [2]. Este nuevo concepto cambia el paradigma de generación a un esquema bidireccional, donde los consumidores pueden ser a la vez productores de electricidad e introducir sus excedentes en la red [3] [4].

A diferencia de las redes eléctricas tradicionales, una SG es una red que permite, tanto a la empresa proveedora de energía como a los consumidores, monitorear el consumo y otras variables de forma continua. Este control dinámico es posible gracias a dispositivos inteligentes colocados del lado del cliente que posibilitan reducir el consumo en horarios de demanda pico a través de políticas de precios, lo que produce un balance del consumo de potencia que beneficia tanto a las empresas como así también a los consumidores [5]. En este escenario, mientras más rápida e inclusiva sea la implementación de una SG, mayores serán los beneficios para ambas partes. Además, una SG aporta a la integración y uso eficiente de recursos naturales, diversificando la matriz energética y reduciendo el impacto ambiental.

Aplicaciones típicas tales como una Infraestructura Avanzada de Medición (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*), Automatización Distribuida (DA, *Distribution Automation*) y Actualización de Tarifas en tiempo real (RTP, *Real Time Pricing*), entre otras, utilizan redes de comunicaciones bidireccionales en su funcionamiento. Así, las nuevas Tecnologías de Comunicación e Informática (ICT, *Information and Communication Technology*) juegan un rol fundamental en la gestión y el control de la red [6].

Si bien, en la actualidad, la evolución de las ICT permite brindar múltiples servicios (como lo son el *streaming* de audio y video, contenido bajo demanda, etc.) desde cualquier red de datos, incluyendo Internet, existen pocos trabajos orientados a ofrecer servicios de comunicaciones que cumplan con los requisitos de una SG. Sin embargo, varios organismos han comenzado a recolectar el fruto de investigaciones y desarrollos, que hasta el 2010 se encontraban de forma aislada en la red, mancomunando esfuerzos para delimitar el marco de trabajo y el alcance a corto y largo plazo que deberá soportar una tecnología de comunicaciones, con el objetivo de que su implementación no signifique una pérdida económica que deban asumir las empresas de energía o grupos inversores.

Una vez reconocidos los requisitos de comunicaciones de una SG, se podrá pasar a la selección y ajuste de tecnologías capaces de soportar diversas aplicaciones, haciendo compatible la interconexión del hogar (*Smart Home*), la ciudad (*Smart City*) y todo el sistema eléctrico (*Smart Grid*) capitalizando este esfuerzo en estándares unificados.

Este trabajo se focalizará en estudiar y utilizar tecnologías de comunicaciones inalámbricas de cuarta generación (4G) debido al bajo costo de implementación y el rápido despliegue de las mismas, evaluando que las mismas cumplan con los requisitos presentes y futuros de una SG, obteniendo una solución flexible y escalable.

1.2. Objetivos.

A continuación se presentan los objetivos generales y específicos de este trabajo.

1.2.1. Objetivos Generales.

Considerando los requerimientos de una SG [7] [8] y las características de las nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas, el objetivo principal de este trabajo es diseñar y evaluar una infraestructura de red para la implementación de una aplicación AMI en una SG utilizando una tecnología inalámbrica [9] de 4G denominada WiMAX.

La elección de esta tecnología se fundamenta en el uso masivo que las infraestructuras de comunicaciones móviles tienen en el mundo, y dado que varias empresas prestadoras de este tipo de servicio están migrando a soluciones 4G (principalmente por su robustez, flexibilidad y alta capacidad de transmisión de datos), se cree conveniente evaluar su uso en este nuevo escenario.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Definir requisitos de comunicaciones para diversas aplicaciones en una SG.
- Realizar un estudio del estado arte acerca de las nuevas tecnologías de comunicaciones (cableadas e inalámbricas) así como protocolos referidos a una SG.
- Presentar un modelo conceptual de comunicaciones para una SG.

- Implementar un modelo apto para la planificación y evaluación de despliegues de celdas WiMAX en diversos escenarios.
- Presentar un escenario piloto de implementación para una ciudad, que combine diversas topologías inalámbricas.

Los resultados obtenidos se incorporarán en una materia optativa de comunicaciones perteneciente a la carrera Ingeniería Eléctrica de la UNRC, como así también, para trabajos futuros en el área.

1.3. Metodología utilizada.

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica a efectos de tener un conocimiento más profundo en el tema para luego contrastar las diferentes alternativas utilizadas en la actualidad. Esto permitirá conocer con exactitud, dependiendo de la aplicación, cuáles son los requerimientos que una SG necesita en los sistemas de comunicación.

Las simulaciones de los diferentes escenarios analizados se realizarán utilizando la plataforma MatLab ®. La metodología de validación de las configuraciones implementadas, es de tipo numérica-analítica, evaluándose la robustez de los mismos en una red compuesta por dispositivos afines.

Dada la novedosa utilización de las técnicas y conceptos estudiados, no existe la posibilidad de utilizar plataformas experimentales que cumplan con los requisitos necesarios.

1.4. Estructura de la Tesis.

El presente documento se encuentra organizado de la siguiente manera: En el Capítulo II se contextualizan las redes inteligentes como próxima evolución de la red eléctrica, buscando identificar los agentes involucrados y órganos normativos. En el Capítulo III se presenta el diseño conceptual de un modelo de comunicaciones para la SG, definiendo los requisitos y performances mínimas que el mismo debe cumplir. Además se introducen las métricas que se utilizarán en la herramienta de simulación y servirán para evaluar el sistema de comunicaciones propuesto.

En el Capítulo IV se realiza una revisión de las principales tecnologías de comunicaciones existentes. Además se estudian los protocolos de varias aplicaciones que han surgido para su implementación en una SG. En el Capítulo V se justificará la elección de WiMAX como solución tecnológica para comunicaciones inalámbricas de cuarta generación, en la red inteligente.

Los Capítulos VI y VII, se ocupan del modelado completo de un sistema WiMAX para dar soporte a distintas aplicaciones en una SG. Dado que un escenario con múltiples estaciones suscriptoras (SS, *Suscriber Station* o particularmente en este trabajo también se las denominará: *SM, Smart Meters*) y múltiples nodos concentradores (BS, *Base Station*)

conllevaría un gasto numérico enorme ralentizando los procesos de simulación. Es por ello que la simulación se separará en dos niveles:

1. **Link-Level Simulation.** El cual se centra en el modelado completo del comportamiento de un enlace teniendo en cuenta principalmente todos los aspectos relacionados a la capa física (PHY) y algunos puntos cruciales de la capa de acceso al medio (MAC). Tiene en cuenta un enlace SS-BS y BS-SS. Este nivel de simulación es muy útil para realizar despliegues aislados (es decir, en donde solo se necesita instalar una única celda) y también se emplea para definir las estructuras de los *transceivers* en los equipos involucrados. El capítulo VI evalúa un escenario de implementación apto para zonas con baja densidad de habitantes en donde una sola estación base brinda cobertura a todos los medidores.
2. **System-Level Simulation.** Se recrea una red con múltiples estaciones suscriptoras y estaciones bases interconectadas, contemplando a diferencia del caso anterior los problemas de interferencias entre BS y SS. El capítulo VII evalúa un escenario urbano densamente poblado en donde es necesario instalar múltiples BS para dar cobertura a los medidores inteligentes instalados. En este caso de estudio, se realiza una simplificación del nivel enlace, ya que el principal atenuante radica en las interferencias entre usuarios y BS propias de la gestión del sistema.

En el apartado Anexos, se adjunta un documento redactado durante el desarrollo de la tesis, que ayudan a profundizar los tópicos tratados. El mismo presenta un resumen orientado al modelado de canales inalámbricos. Actualmente se ha incorporado a la bibliografía de referencia por la cátedra de Radio-Comunicaciones, perteneciente al departamento de Telecomunicaciones, de la facultad de ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Finalmente, en el Capítulo VIII, se presentan las conclusiones generales del presente trabajo de tesis.

CAPÍTULO II

RED ELÉCTRICA INTELIGENTE. SMART GRID.

2.1. Introducción.

La red eléctrica actual fue diseñada con un único objetivo, brindar servicio de electricidad a los hogares e industria. Sin embargo, el crecimiento en consumo que experimentaron tanto los hogares como el sector de producción no se ha correspondido con los requisitos de diseño. Esto se traduce en que algunos aspectos que parecen obvios y necesarios hoy en día no se tuvieron en cuenta en el pasado. Ejemplos de los mismos son: garantizar la eficiencia energética, considerar el impacto medioambiental, ser flexible para incorporar fácilmente cualquier fuente de energía alternativa o proporcionar una amplia cartera de opciones de contratación energética al cliente final.

El principio básico que está detrás de esta nueva Red Eléctrica Inteligente (SG, *Smart Grid*) es el flujo bidireccional de información y de electricidad entre el cliente final y la compañía eléctrica, que busca mejorar la eficiencia del sistema actual. Para ello cobran importancia singular las infraestructuras y tecnologías de comunicación de datos, y surgen nuevos conceptos como los medidores inteligentes (SM, *Smart Meter*) y otro tipo de dispositivos capaces de interactuar de manera autónoma y/o remota.

El objetivo de este capítulo es introducir la problemática actual de la red eléctrica planteando la inminente necesidad de una red más eficiente que maneje un flujo de información elevado (contemplando no solo la información recolectada por los medidores, sino también otro tipo de aplicaciones tales como *streaming* de audio y video), para así optimizar la toma de decisiones proactivas en el sistema. Esto conlleva a una convergencia y fuerte articulación entre el campo “eléctrico” y el de las “telecomunicaciones” (convergencia “teleco-eléctrica”). También se hará hincapié en la escasez de modelos de desarrollo que faciliten la interoperabilidad de los dispositivos incluidos en esta nueva red, principalmente debido a la falta de estándares.

Siempre en el marco de trabajo de la tesis, este capítulo cumple la función de presentar a los actores y promotores, tanto a nivel nacional como internacional, de la “*Smart Grid*”. Basados en las normas y requisitos que estos organismos proponen, los posteriores capítulos desarrollarán una infraestructura de telecomunicaciones capaz de cumplir con los mismos, y de esta forma dando soporte a nuevas aplicaciones que contribuirán a transformar a la red eléctrica presente.

2.2 Evolución de la red eléctrica: necesidad de una Red más eficiente.

Durante la mayor parte del siglo pasado, las redes eléctricas constituyeron el emblema del progreso de las sociedades. A finales del siglo XIX la producción de electricidad se realizaba a muy baja escala con objetivos de suministrar este recurso en localidades pequeñas, en las cuales el uso primordial era la iluminación de la vía pública. En la década de 1910, gracias al exponencial avance en ciencia y tecnología, se pudo resolver el problema del transporte de energía en largas distancias con pérdidas no tan significativas y líneas de hasta 135.000 Volts. Este paso fue fundamental para incentivar el desarrollo de centrales hidráulicas de generación de energía eléctrica, que por cuestiones geográficas y estratégicas se encontraban aisladas de las ciudades. Sin embargo, dados los bajos costos de los combustibles (en su mayoría fósiles) la generación se orientará por casi más de 80 años hacia el uso de máquinas de combustión.

En la década de 1920 el despliegue de la red eléctrica se masificó, transformándose en el sistema interconectado más extenso del planeta. Uno de los aspectos más sobresalientes de este sistema es que si bien posee, en ciertos lugares, más de 60 años, la confiabilidad del mismo no se alteró frente a los constantes avances e incrementos de la demanda durante ese período.

Fue justamente esta alta confiabilidad la que relegó a la red eléctrica de los fuertes avances tecnológicos a los que constantemente, y en un período de tiempo mucho menor, experimentaron las redes de información y particularmente la red de datos mundial conocida como Internet.

Hasta hace poco más de 15 años, los requisitos impuestos por la demanda eléctrica eran muy bajos, por lo que el sistema podía soportarlos sin grandes cambios. Sin embargo, en los últimos años, las restricciones se han ido agravando por un fuerte incremento de la demanda que no solo se debe al crecimiento demográfico sino también a los nuevos dispositivos electrónicos que buscan aumentar el confort de los individuos (aires acondicionados, computadoras, televisores y demás dispositivos) aumentando así los fallos en el sistema, o dicho de otro modo, reduciendo la confiabilidad del mismo. Podemos citar un ejemplo que ilustra este punto:

“En los EE.UU. se han producido cinco apagones masivos en los últimos 40 años, tres de los cuales han ocurrido en los últimos nueve.”^[10].

Cabe resaltar que estos cortes de suministro presentan un impacto económico y social enorme. La tabla que se muestra a continuación, detalla la pérdida aproximada en dólares que experimentan diversos mercados al sufrir una interrupción eléctrica de una hora.^[11]

TABLA 2.1. Coste medio por hora tras un corte del suministro eléctrico.

Sector	Costo (U\$S)
Reserva de Billetes de Avión	90.000
Industria de Semiconductores	2.000.000
Operación con Tarjetas de Crédito	2.580.000
Operaciones Bursátiles	6.480.000

Por otro lado existen otras causas, ligadas de una forma indirecta al exponencial crecimiento de la demanda, que contribuyen a generar un panorama aún más crítico para el sistema eléctrico actual. A continuación, se mencionan dichos factores.

- **Combustibles fósiles y contaminación ambiental.** El constante aumento en los precios de los combustibles, que son utilizados para generar más del 80% de la energía eléctrica que se consume, no solo impacta en el precio de venta de la misma sino también en la contaminación ambiental, ya que en el proceso de combustión se liberan gases que aumentan el efecto invernadero contribuyendo así, al cambio climático del planeta.
- **Manejo ineficiente de los recursos disponibles.** Actualmente, los picos de demanda obligan a activar plantas especiales de generación para cubrir las necesidades de energía en esas horas. Esas plantas se utilizan únicamente durante esos periodos, con los sobre-costes que ello supone y que repercuten directamente en las facturas que pagamos. Los picos se suelen producir en franjas horarias donde todos los consumidores acceden simultáneamente a sus electrodomésticos (tales como iluminación, sistemas de climatización, heladeras y lavadoras principalmente), aunque en general no sean conscientes de ello. Este problema podría solucionarse si los consumidores tuvieran un rol más activo en el sistema al conocer en tiempo real el costo de la energía en ese horario y poder así tomar medidas que terminen impactando en su propia economía, y descomprimiendo la curva de carga de demanda. Es pertinente hacer hincapié en este punto, ya que por cada kilovatio perdido, es necesario “quemar” más combustible, lo que no solo repercute, como antes se explicó, en el precio de venta sino también en el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se cita un ejemplo dado por la *General Electric Company* que ilustra esta problemática.

“Aumentar la eficiencia en un 5% en la red eléctrica de USA, las emisiones de CO2 al medio ambiente se reducirían en 262,1 billones de libras lo que equivaldría a eliminar del parque automotor de dicho país 21,6 millones de vehículos.”^[10]

- **Generación distribuida y alternativa.** Es muy difícil para la matriz energética actual permitir la inserción de generación distribuida, sin incurrir en serios problemas que

afecten a la calidad de energía y expongan a todo el sistema a sufrir fallas en cascada que lo podrían dejar fuera de servicio por mucho tiempo. Esta dificultad se debe fundamentalmente al escaso —y en la mayoría de las veces nulo— manejo de información en tiempo real que existe entre los pequeños productores y el agente de control. Las aplicaciones de comunicación y control capaces de integrar fuentes de generación distribuida se la conoce como DR (*Distributed Resource*, por sus siglas en inglés)

- **Nuevos desafíos. El Vehículo Eléctrico.** La infraestructura actual no es apta para la incorporación masiva de vehículos eléctricos, debido principalmente al aumento de la demanda energética en el contexto de una red poco flexible. Esto se contradice con las expectativas que ciertos organismos tienen en futuros próximos. Por ejemplo, la Unión Europea, en el denominado “*White Paper: Transport 2050*” [12] plantea que el 50% de los vehículos en las principales ciudades serán sustituidos por vehículos eléctricos.

Todos estos factores, dan cuenta del claro modelo energético basado en la utilización de combustibles fósiles que la humanidad ha seguido durante poco más de un siglo, es decir un modelo unidireccional constituido por: GENERACIÓN – TRANSPORTE – DISTRIBUCIÓN y CONSUMO. Ver Figura 2.1.

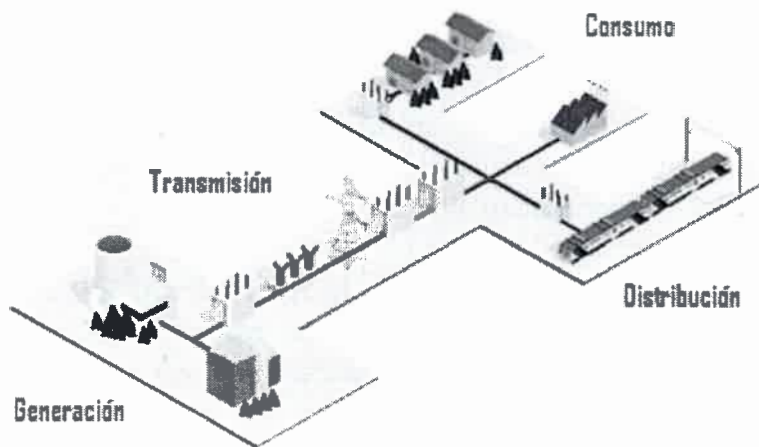


Figura 2.1. Modelo energético actual.

Entonces, nos encontramos con una demanda en constante crecimiento, una escasez de recursos que impacta en el precio de la generación, un sistema incapaz de poder incluir nuevas formas de energía que diversificarían la matriz actual, un manejo ineficiente del sistema y sobre todo, una participación pasiva de los consumidores. En conclusión, el modelo actual es insostenible, por lo que es de suma urgencia encontrar o redefinir un nuevo modelo.

2.3. Necesidad de la convergencia Teleco-Eléctrica.

Las infraestructuras de redes de energía eléctrica y telecomunicaciones se desplegaron de forma independiente desde el comienzo. La relación que poseían era meramente operativa, es decir, la red eléctrica se servía de la red en telecomunicaciones solo para la medición y control remoto de estaciones, generadores y celdas, mientras que la red de telecomunicaciones necesitaba del suministro eléctrico para su funcionamiento. Sin embargo, los tiempos han cambiado; y como ya se explicó, el modelo energético actual debe transformarse en un modelo más eficiente y con mayor participación de los consumidores. El estado de la técnica nos ofrece una posibilidad para realizar este proceso de transformación de forma paulatina pero con resultados radicales a corto plazo, y es implementando todos los avances tecnológicos en el campo de las telecomunicaciones a nuestro actual modelo energético.

La primer forma para aumentar la eficiencia de la red radica en la capacidad que tengan los consumidores para ahorrar energía. Sin embargo, esto implica automatizar todo el proceso de control de consumo y métodos de inclusión de fuentes de generación distribuida, mediante una red convergente de energía y telecomunicaciones, base fundamental para la estimación y planificación de operaciones, ya que se brinda información actualizada y en tiempo real al usuario y se le otorga una participación activa dentro de la red estela poder tomar decisiones de ahorro que impacten directamente en su economía doméstica.

Por otro lado, uno de los aspectos más importantes en los sistemas de generación basados en energías renovables es la correlación temporal entre la demanda y la generación. La clave para aprovechar estos recursos es la adaptación de la demanda al suministro (control de la demanda) y no al contrario. Nuevamente podemos apreciar que la solución para resolver este problema viene aparejada con la convergencia de las redes de electricidad y telecomunicaciones.

La convergencia de infraestructuras jugará un papel primordial para ofrecer una solución viable a la demanda creciente de energía, la mejora de la eficiencia en su uso y la integración de fuentes de generación distribuida. Las telecomunicaciones serán las encargadas de permitir un sistema de energía distribuido y controlado que garantice la seguridad y estabilidad del suministro, así como la privacidad de la información que circula en la red.

2.4. Smart Grid.

Es en este contexto que surge el concepto de la red Inteligente eléctrica (SG, *Smart Grid*). Este nuevo concepto cambia el paradigma de generación a un esquema bidireccional, donde los consumidores pueden ser a la vez productores de electricidad e introducir sus excedentes en la red [5]. Además, aumenta el flujo de información en todos los puntos de la red eléctrica al utilizar infraestructuras de medición que facilitan la toma de decisiones para prevenir,

detectar y corregir problemas de forma dinámica y en cortos tiempos. La Figura 2.2 indica algunos de los principales componentes que desea integrar la SG.

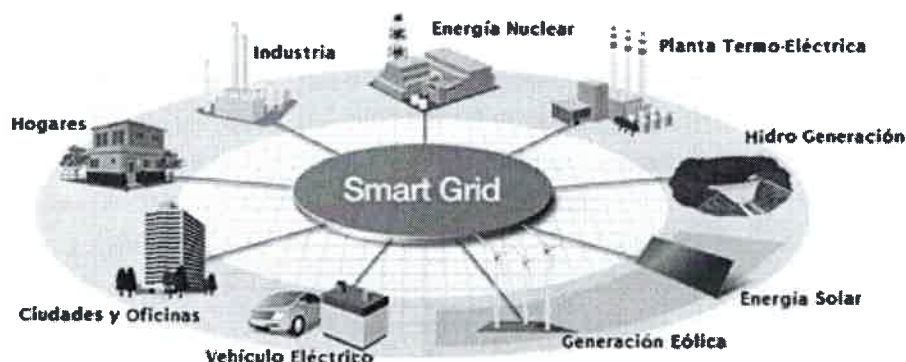


Figura 2.2. Modelo energético para una *Smart Grid*.

El modelo de generación y distribución de la energía eléctrica es actualmente el mismo que existía hace décadas, mientras que su uso ha sufrido cambios radicales en este lapso. Se continúa utilizando un esquema unidireccional de información en el que no hay realimentación del dispendio de energía por parte de los hogares. Los desequilibrios entre capacidad de generación y consumo tienen como consecuencia que parte de la energía no se aproveche. El concepto de *Smart Grid* rompe con esta estructura proponiendo un esquema de comunicación bidireccional, de tal manera que se ajuste perfectamente la producción al consumo en tiempo real, mejorando así la distribución y reduciendo el gasto [13]. En este escenario, mientras más rápida e inclusiva sea la implementación de una SG, mayores serán los beneficios para ambas partes. Además, una SG aporta a la integración y uso eficiente de recursos naturales.

La clave fundamental de una SG radica en el uso de redes de telecomunicaciones, encargadas de trasladar un gran caudal de información. Esto permitirá una gestión más eficiente de la red eléctrica, incorporando funcionalidades como soporte de nuevas aplicaciones de valor agregado que dará un rol más activo a los consumidores; y la posibilidad de incorporar fuentes de energía renovables que ayudará a diversificar la matriz energética.

2.4.1. Modelo Conceptual.

El modelo conceptual propuesto por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST, *National Institute of Standards and Technology*) es una herramienta muy útil para describir y discutir todos los aspectos que refieren una *Smart Grid*. En la Fig. 2.3 se resaltan las 7 áreas fundamentales en las que se deberá trabajar para resolver los problemas de interoperabilidad e interdependencias en el sistema eléctrico, reflejando el rol cada vez más importante de las tecnologías de comunicación como clave para afrontar estos desafíos.

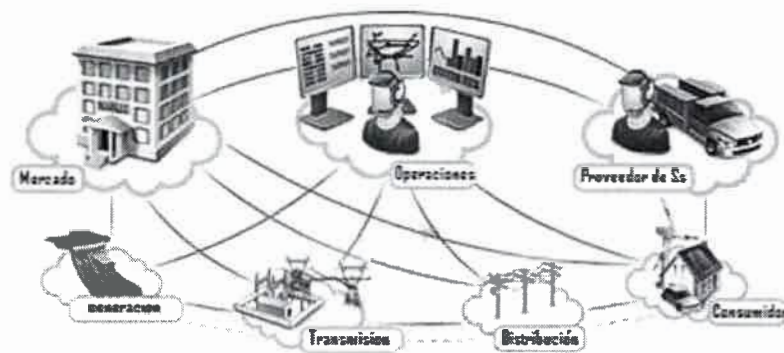


Figura 2.3. Modelo NIST [14].

El modelo define 7 dominios, en el que se presentan distintas aplicaciones y actores, que a su vez están interrelacionados con las demás áreas. Las interfaces de carácter eléctrico o conexiones de comunicaciones juegan un rol fundamental en el funcionamiento de este sistema. En la Figura 2.3, las interfaces eléctricas se muestran con líneas discontinuas amarillas y las interfaces de comunicación con líneas continuas azules. Esta es la clave que potencia la bi-direccionalidad del sistema fomentando aplicaciones de tiempo real. En general, ocurrirá que los actores en un determinado dominio tendrán intereses y objetivos similares:

- **Cientes** (Customers). Son los usuarios finales de la electricidad. También pueden generar, almacenar y gestionar el uso de la energía. Existen tres tipos básicos de clientes: residencial, empresarial e industrial.
- **Mercados** (Markets). Son los operadores y los participantes en los mercados de la electricidad.
- **Proveedores de Servicios** (Service Providers). Son las organizaciones que proporcionan servicios a los clientes eléctricos y las Utilities.
- **Operaciones** (Operations). Los gestores del movimiento de la energía.
- **Generadores** (Bulk Generation). Son los que producen la energía al por mayor. También pueden almacenar la energía para distribuirla en diferido.
- **Transmisión** (Transmission). Son los que transportan la energía al por mayor a las grandes distancias. También pueden almacenar y generar electricidad.
- **Distribución** (Distribution). Son los que distribuyen la electricidad hacia y desde los clientes. También pueden almacenar y generar electricidad.

Profundizando en este modelo, se presenta en la Figura 2.4 un diagrama que muestra una visión particular de cómo iniciar el abordaje del problema de integración de los siete

dominios del modelo conceptual. Los módulos Gateway y tecnologías de comunicación son las encargadas de interconectar los distintos actores del sistema satisfaciendo los requisitos que previamente deberán definirse.

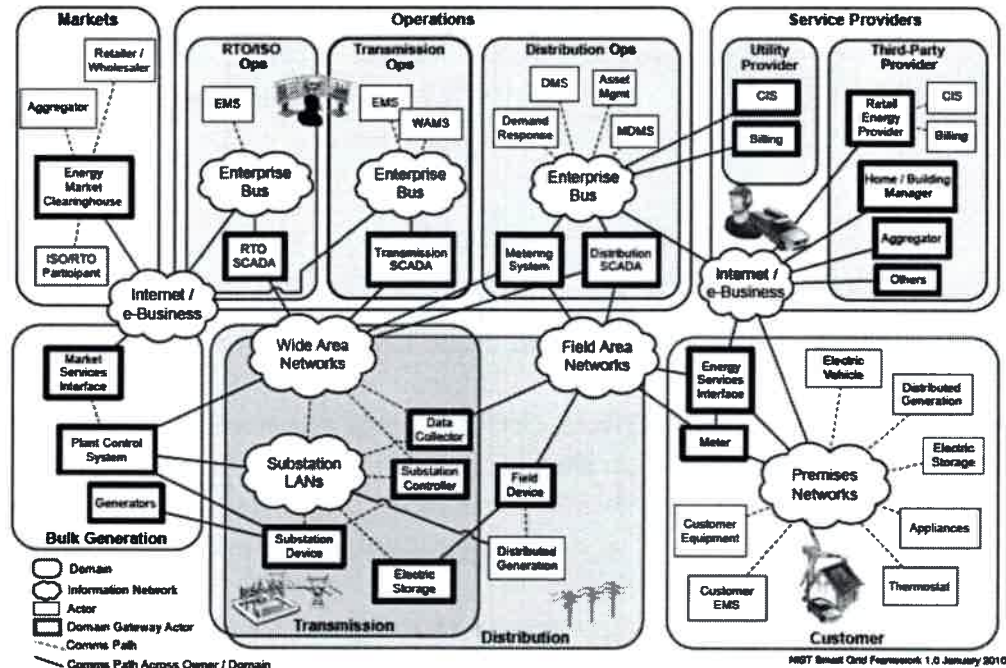


Figura 2.4. Modelo de Interoperabilidad [14].

En este diagrama encontramos elementos que pueden ser más familiares:

- **A nivel de usuario.** Dentro del dominio de cliente, encontramos contadores (que deberán ser inteligentes, es decir, capaces de intercambiar información con la compañía suministradora y con el usuario), vehículo eléctrico, fuentes de generación distribuida (paneles solares, por ejemplo), electrodomésticos, termostatos, equipos de cliente, etc.
- **A nivel de ingeniería de telecomunicaciones.** Encontramos redes de área local (LAN, local area networks) a nivel de subestación para la interconexión de dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs), también encontramos redes LAN en los diferentes centros de operaciones para llevar los datos a los sistemas de adquisición de datos (SCADAs), redes amplias (WAN, wide area network) para interconexión de redes a larga distancia. A este nivel también vemos la conexión a través de internet entre el dominio del cliente, los proveedores de servicios y operaciones.

Observando la anterior figura, es fácil percibir el rol crucial que juegan las Tecnologías de Información y Telecomunicaciones para el desarrollo y operación de la red. Cada dominio posee aplicaciones y requisitos de comunicaciones diferentes, tal como se estudiará en el capítulo III y IV. Existe un nivel de interconexión total, lo que permite no solo realizar un

manejo distribuido de la información sino también un monitoreo permanente, acelerando los tiempos de correcciones de fallas y recupero del sistema.

Esta tesis presenta un análisis específico orientada una aplicación en particular a implementarse en el dominio de los consumidores; sin embargo los procedimientos utilizados podrán extrapolarse para evaluar viabilidad de otras aplicaciones en otras áreas sin mayor complejidad.

2.4.2. Objetivos de la SG.

Cabe aclarar que no existe una definición única para el concepto de *Smart Grid*. Sin embargo, importantes entes reguladores coinciden en los objetivos que dicha red deberá contemplar [97] [98].

- **Aspectos Sociales y demográficos:** el nuevo modelo debe contemplar los cambios inherentes de una sociedad que crece exigiendo mayor confort y calidad de vida, con el consiguiente impacto en el aumento exponencial de la demanda energética.
- **Cuestiones ambientales:** alcanzar los objetivos propuestos por el Protocolo de Kyoto, a saber, aumentar la conciencia social, reducir la contaminación ambiental, aumentar la eficiencia en el consumo y fomentar modelos de generación alternativa sustentables.
- **Generación Distribuida y fuentes de Energía Renovables:** facilitar la integración de los mismos al sistema eléctrico, permitiendo una gestión local de los recursos energéticos.
- **Interoperabilidad entre redes eléctricas:** permitir la incorporación de mercados internos (gracias a la inclusión de “generación distribuida”), con posibilidades de intercambiar información con otros agentes o dispositivos de la red de una forma simple y estandarizada.
- **Seguridad en el suministro:** aumentar la capacidad de generación, fiabilidad y calidad de la energía a suministrar. Contemplar nuevas formas de almacenamiento, tales como “*Energy Storage in Organic Fuels*”, “*Hydrogen Storage*” y “*Lead-Acid, Sodium/Sulfur Batteries*”, etc. [96].
- **Automatización de la red eléctrica:** realizar un mantenimiento mucho más eficiente de todos los componentes de la red. Facilitar la gestión remota. En la actualidad existen diversos grupos de investigación que tratan sobre estos conceptos exponiendo una arquitectura basada en la norma IEC 61850 [5].

2.4.3. Agentes presentes en una SG.

Gracias a la liberación y dinamización del mercado energético, cada vez es mayor el número de agentes implicados en el futuro del suministro eléctrico. Desde miembros del gobierno hasta los usuarios finales, cada agente colaborará para dar forma al sistema de SG.

- **Usuarios.** Demanda de nuevos y mejorados servicios, con la posibilidad de interconectar micro-redes de generación propia y así poder vender el excedente energético generado. Por otro lado, existirá un mayor control y programación del consumo gracias a la tarificación en tiempo real.
- **Empresas responsables de gestionar los servicios energéticos.** Estas empresas serán las encargadas de hacer tangible el ahorro obtenido gracias a las mejoras implementadas tanto en la red, como en los hogares, resaltando también el ahorro obtenido gracias a los cambios en los hábitos de consumo energético de las personas.
- **Investigadores.** La cooperación entre las universidades y centros de investigación, compañías eléctricas, fabricantes, reguladores y legisladores será imprescindible para implementar el desarrollo tecnológico requerido.
- **Reguladores.** El mercado energético y los servicios relacionados, deben ser apoyados por un marco regulatorio bien definido, que contemple todos los escenarios de desarrollo posibles y garantice la estabilidad de los servicios prestados.
- **Organismos gubernamentales.** Los gobiernos tendrán que preparar una nueva legislación que se encargue de regir todos los aspectos y trámites relacionados. Si bien se espera que el aumento de la competencia repercuta en una reducción de las tarifas, la generación distribuida utilizando energías renovables requerirá una fuerte inversión inicial.

2.5. Normalización.

En cuanto a la normalización o estandarización de las redes inteligentes, no existe en la actualidad ninguna normativa vigente y unificadora, sin embargo se pueden distinguir distintos agentes que participan en ámbitos internacionales y nacionales que aúnan esfuerzos en busca de estándares abiertos que faciliten la interoperabilidad y convergencia de todos los sistemas y aplicaciones de esta nueva red. A continuación, se mencionan los referentes más importantes con las correspondientes contribuciones de los mismos.

2.5.1 Ámbito Internacional.

Dentro del ámbito internacional, la vanguardia en avances sobre la estandarización de las nuevas redes inteligentes se lleva a cabo principalmente en dos regiones: América del Norte y Europa.

NIST. La misión de este instituto es promover la innovación y la competencia industrial en Estados Unidos mediante avances en metrología, normas y tecnología de forma que mejoren la estabilidad económica y la calidad de vida de la sociedad. En particular, dentro del campo de las *Smart Grids*, el NIST propone:

“coordinar el desarrollo de protocolos y normas para la gestión de la información para lograr la interoperabilidad de los dispositivos y sistemas en la REI”

Para ello, esta institución ha creado los siguientes documentos con recomendaciones para desarrolladores e ingenieros de sistemas eléctricos y en telecomunicaciones:

- NIST 1108R2 *“NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standard,”*, Febrero 2012, [14].
- NISTIR 7628 *“Guidelines for Smart Smart Grid Grid Cyber Security Security,”*, Junio 2011, [15].
- NISTIR 7823 *“Advanced Metering Infrastructure – Smart Meter Upgradeability Test Framenwork,”*, Julio 2012, [16].

Por otro lado, encabezando Europa se encuentra la *International Electrotechnical Commision* (IEC). IEC es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas con sede en Ginebra. En lo referente a *Smart Grid*, esta comisión ya posee un grupo de trabajo dedicado a la temática denominado *Smart Grids Strategic Group*. El objetivo de este grupo consiste en:

“desarrollar un marco para el trabajo de IEC nuevos protocolos y normas para la gestión de la información logrando la interoperabilidad de todos los dispositivos y sistemas en una REI.”

Al igual que el NIST, este organismo ya posee un conjunto de documentos que buscan regular los desarrollos e implementaciones en una SG. A continuación, se citan algunos de los más utilizados:

- IEC *Smart Grid Standarization Roadmap*, RFC, [17].
- IEC 61970 *“Common Information Model (CIM) / Energy Management”*.
- IEC 61850 *“Substation Automation”*.
- IEC 62351 *“Security”*.
- IEC 62056 *“Data exchange for meter reading, tariff and load control”*.

- IEC 61058 “*Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*”.

Los estándares mencionados pueden ser consultados desde el sitio oficial de dicho organismo [18].

Por otro lado, a estos esfuerzos se incorpora la **EU Comisión Task Force for Smart Grids**, cuya misión es asistir a la Comisión Europea en las políticas y directrices de la reglamentación europea y coordinar los primeros pasos hacia la implementación de *Smart Grid* en la prestación del tercer paquete energético, que consta de dos directivas sobre mercado interior de electricidad y gas natural, y tres Reglamentos sobre acceso a redes de transporte de electricidad, gas natural, y sobre la Agencia de Cooperación de Reguladores de Energía (ACER).

Finalmente, debemos mencionar que la IEEE también está participando activamente a través del programa denominado **IEEE P2030** [19], un grupo de trabajo dedicado al desarrollo de una guía para la interoperabilidad para la operación de tecnologías energéticas y tecnología de la información con el sistema de energía eléctrica, las cargas y aplicaciones de usuario final.

2.5.2 Ámbito Nacional.

Actualmente, en el ámbito nacional, dos grandes instituciones encabezan esta búsqueda por la normalización y regulación de las SG.

Asociación Electrotécnica Argentina (AEA), con las siguientes recomendaciones a nivel nacional para redes inteligentes eléctricas [20]:

- Documento N°1. Concepto de Red Eléctrica Inteligente, beneficios y desafíos para su implementación.
- Documento N°2. Aplicación a nivel Nacional, Latinoamericano y Mundial.
- Documento N°3. Recomendaciones de implementación.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), con los siguientes documentos [21]:

- IRAM 62053-22 Equipos de medición de la electricidad (c.a.). Requisitos particulares. Parte 22. Medidores estáticos de energía activa (clases 0,2 S y 0,5 S).
- IRAM 62053-23 Equipos de medición de la electricidad (c.a.). Requisitos particulares. Parte 23. Medidores estáticos de energía reactiva (clases 2 y 3).

- IRAM 62742 Registradores e interfaz de comunicación (RIC) para ser conectados a medidores de energía eléctrica. Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo

Ambas instituciones locales se apoyan en los trabajos mancomunados realizados por los organismos internacionales previamente citados.

2.6. Conclusiones.

El sistemático aumento del consumo eléctrico como indicador de desarrollo marcó la tendencia de todo el siglo XX. Sin embargo, el modelo energético utilizado hasta el momento, dada su alta fiabilidad durante más de 60 años, no es sostenible, y de hecho ha comenzado a colapsar.

Se debe proponer un nuevo modelo que no se limite sólo a un replanteamiento de las nuevas formas de producción de energía. Este modelo debe contemplar cuatro factores fundamentales para su desarrollo:

1. Eficiencia
2. Fiabilidad
3. Flexibilidad
4. Sustentabilidad con vista al cuidado de aspectos ambientales

Es en este contexto que *Smart Grid* aspira a desarrollar una nueva red eléctrica basada en estos cuatro factores, sirviéndose de los avances tecnológicos en la electrónica y las telecomunicaciones, para así garantizar una calidad del suministro eléctrico más elevada y reducir el impacto ambiental. *Smart Grid* no es una definición puntual sino una nueva forma de pensar, que busca cambiar el paradigma energético actual.

Un tema importante para facilitar el avance de este concepto es la necesidad de una estandarización/normalización de todo lo referente a las redes inteligentes. En este capítulo se presentaron diversos organismos de ámbitos internacionales y nacionales que actualmente trabajan en este punto. En el ámbito internacional las principales entidades citadas fueron el NIST y el IEC. Desde enero de 2010, ambos institutos, establecieron un fuerte nexo para mancomunar esfuerzos en busca de una estandarización de las SG. Por otro lado, en el ámbito nacional se presentó la actividad realizada por AEA y el instituto de normalización nacional IRAM.

A lo largo de este capítulo se identificó la problemática que posee la red eléctrica actual, resaltando la urgente necesidad de diversificar la matriz energética y lograr un consumo más eficiente. Para ello es importante manejar grandes caudales de información, bi-direccionales, permitiendo una mayor interactividad entre consumidores, distribuidores y agentes

reguladores del mercado. Los mismos serán los encargados de coordinar y detectar las necesidades que debe poseer esta nueva infraestructura teleco-eléctrica, logrando gracias a un esfuerzo solidarizado, estandarizar sistemas de comunicaciones aptos para el soporte de aplicaciones en una red inteligente.

En el siguiente capítulo se presentarán los conceptos elementales para desarrollar una infraestructura de comunicaciones en una SG. Las recomendaciones y estándares mencionados hasta este momento, constituyen las bases del modelo que se estudiará a lo largo de este trabajo.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID.

3.1. Introducción.

La creación de redes de comunicaciones bidireccionales que se agreguen a la red actual eléctrica, permitirán la incorporación de nuevas fuentes de generación distribuida, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y mejorar la eficiencia en los actuales flujos de potencia. El monitoreo continuo permitirá la restauración del sistema de manera automática (*self-healing*) y aumentará la estabilidad del sistema. Además se podrá ofrecer a los consumidores nuevos servicios e información actualizada de los precios de consumo. Sin embargo será necesario adaptar las protecciones y modos de operación en isla, utilizados para mantener el suministro eléctrico en zonas aisladas cuando ocurren fallas generales en el sistema de energía.

El diseño de una arquitectura de comunicaciones que cumpla con estos requisitos de forma segura, será la clave para el sustento de las aplicaciones mencionadas a lo largo de este documento. Varios son los aspectos a considerar para el diseño de una infraestructura viable, y obviamente la misma es estrechamente dependiente de las aplicaciones a correr en el sistema. Sin embargo podemos independizarnos de aplicaciones concretas y mencionar los puntos clave a tener en cuenta para un despliegue de una red inteligente. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, las normas y tecnologías son el punto de partida, pero de nada sirven si el diseñador no sabe qué métricas debe utilizar para evaluar el rendimiento de la infraestructura de comunicaciones que se desea desplegar.

Este capítulo busca introducir al lector en los conceptos básicos que ayudan a especificar un sistema de comunicaciones para una SG. A lo largo del mismo, se diseñará el modelo conceptual para la aplicación concreta que esta tesis plantea. De una forma general se esboza una guía sistemática que incluye criterios de diseño y evaluación para una infraestructura de comunicaciones dentro de una SG y se finaliza con la justificación del uso de tecnologías inalámbricas para realizar sistemas de comunicaciones de rápido despliegue y bajo costo. En los próximos capítulos se realizará el estudio técnico de viabilidad del modelo planteado utilizando tecnologías y protocolos previamente comentados en el capítulo anterior.

3.2. Diseño de una SG.

Aún no existe una metodología bien definida para afrontar la planificación de una SG. Tras realizar una extensa búsqueda bibliográfica, se optó por utilizar el modelo multi-capa propuesto por *Sonoma Innovation* [22] [23]. Este modelo se puede apreciar en la Figura 3.1. Se define una primera capa en la que se encuentra el modelo conceptual del NIST previamente

citado. En el segundo nivel se expone el marco de interoperabilidad tal como fue presentado en la Figura 2.4 del capítulo anterior. El mismo es utilizado para definir el diseño de modelos y el mapeo de requerimientos para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. En cuanto a la estandarización y formalización de este marco de trabajo, el NIST ha identificado como planes de acción prioritaria al estándar IEEE P2030 y a la serie de estándares IEEE 1547 (estos últimos encargados de la interconexión de los recursos distribuidos con la red eléctrica). En la tercera capa se desprenden tres áreas de trabajo:

- Sistemas de energía y potencia
- Arquitectura de Comunicaciones
- Tecnologías de Información

Mientras que las dos primeras capas se utilizan para definir requisitos, es recién en la tercera capa en la que se centran todos los desafíos de implementación tanto en la electrónica, el software y la infraestructura de comunicaciones necesaria para cada uno de los elementos que la constituyen: Infraestructura de comunicaciones, Arquitectura de software o también conocida como Tecnologías de Información (IT, *Information Technology*) y el sistema eléctrico de potencia en sí mismo. Finalmente en el cuarto nivel se presentan las diversas aplicaciones que se montan sobre las capas anteriormente definidas. Es aquí en donde se realiza la representación y procesamiento de la información relevada del sistema para la toma de decisiones.

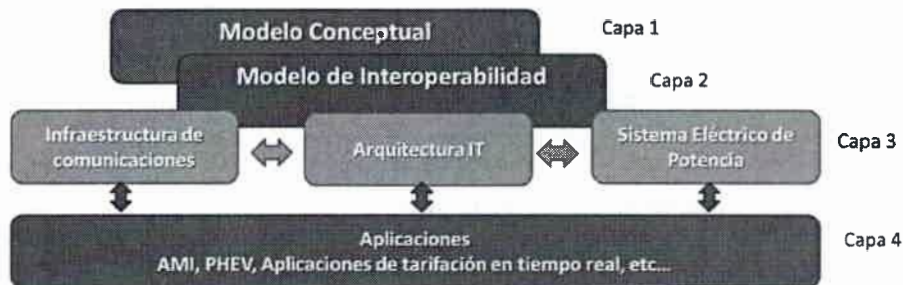


Figura 3.1. Modelo multicapa propuesto por Sonoma Innovation.

La capa de aplicaciones es la que definirá los requisitos de comunicaciones de una red inteligente. Como se ha mencionado en varias oportunidades a lo largo de este documento las aplicaciones que se utilizarán en el estudio son para mediciones y actualización de parámetros en tiempo real, constituyendo lo que se conoce como una Infraestructura Avanzada de Mediciones (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*).

3.3 Infraestructura Avanzada de Medición en una SG.

La automatización del proceso de lectura de medidores es una aplicación capaz de agilizar las operaciones del distribuidor haciendo más eficiente este proceso. Sin

embargo, con el aumento de la demanda, las limitaciones operativas y medio-ambientales y el envejecimiento de las infraestructuras, las empresas de servicios públicos buscan algo más que datos para confeccionar facturas mensuales. Se debe impulsar el uso de nuevas aplicaciones de valor agregado satisfaciendo la demanda de los usuarios.

Los primeros pasos en el despliegue de una SG están encaminados al control de forma remota de los medidores eléctricos y gas. Tras la inversión inicial en medidores inteligentes, los mayores ingresos se conseguirán con una política acertada de implantación de AMI en el mercado. El procesado en tiempo real de los datos de consumo, la tarificación en base a la demanda actual de la red y el uso más eficiente de la energía son ejemplos de nuevas capacidades exigidas a la red eléctrica. Para alcanzar estas metas, es imprescindible dotar de flexibilidad y mayor rapidez en la adquisición de datos en la red. Una AMI permite el acceso online de los datos de medición actuales, evitando los costosos desplazamientos de las mediciones manuales. Las lecturas de datos se incrementan (realizando varias adquisiciones diarias en lugar de mensuales) sirviéndose de sistemas de medición remota (AMR, *Automatic Meter Reading*). Así, las distribuidoras eléctricas reciben datos confiables de consumo evitando las estimaciones en las facturas, reduciendo en gran medida las quejas de los usuarios. Además, AMI ayuda a un correcto aislamiento de fallos en la red de los usuarios de forma remota y eliminando desplazamientos innecesarios.

La comunicación entre la infraestructura AMI y la red eléctrica está bajo estudio. La adopción de estándares abiertos es una decisión acertada para garantizar interoperabilidad entre los equipos y garantizar seguridad de los datos.

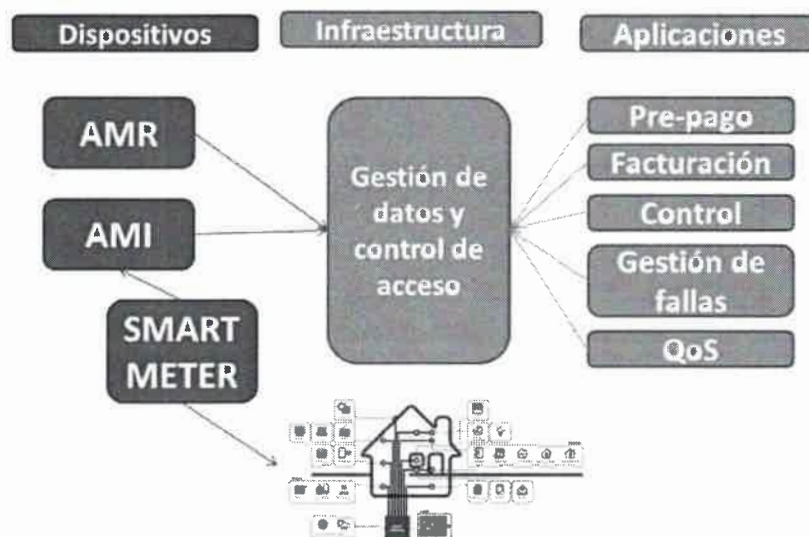


Figura 3.2. Aplicaciones en una SG.

Es importante adoptar estándares abiertos que garanticen la interoperabilidad entre diferentes equipos y la convergencia con distintas tecnologías de comunicaciones [24]. Las AMIs requieren una alta capacidad de actualización para afrontar nuevos servicios. Por ejemplo, comunicación bidireccional con los usuarios y respuestas instantáneas a sus demandas, son algunas de las futuras aplicaciones de una SG, en donde intervendrán infraestructuras AMIs.

Por otro lado un sin número de empresas están mancomunando esfuerzos desarrollando dispositivos que permitan realizar mediciones en tiempo real de consumo, fallas y actualización tarifaria. Estas mediciones no solo deben ser reportadas a los centros de control sino que también deben realimentar a los mismos usuarios (utilizando, por ejemplo, pantallas, alarmas, etc.).

A estos dispositivos los denominaremos *Smart Meters (SM)*. Dichos dispositivos constan de 3 elementos básicos, el sistema de adquisición y cálculo, la memoria y finalmente el dispositivo de comunicación que es utilizado para transmitir los datos procesados. La principal diferencia con los medidores tradicionales radica en el tercer elemento, es decir, en el manejo dinámico que se le da a la información relevada. Un SM además es capaz de comunicarse con otros dispositivos del hogar, utilizando una red de área local pudiendo así, por ejemplo, comunicarse con una pantalla de visualización de consumo instantáneo, termostatos, calentadores de agua y otros dispositivos.

El flujo de información con el agente de control y/o mercado es bidireccional y con una frecuencia tan alta como se requiera. Esta información disponible en todo momento permite descubrir problemas (por ejemplo, baja o altas de tensión) lo suficientemente rápido para tomar las respectivas medidas correctivas. Todos los equipos son sincronizados por una estación base.

La implementación de *smart meters* permitirá a los usuarios emplear la electricidad de forma más eficiente y, al mismo tiempo, proporcionará a las compañías la capacidad de detectar problemas en sus sistemas y gestionar la demanda [25]. Al proporcionar información en tiempo real a los consumidores, el sistema propiciará un cambio en el modelo tradicional de consumo de energía, respondiendo a las variaciones instantáneas en el precio. Como consecuencia, se producirá una reducción en la demanda, lo que posibilitará una disminución de la capacidad de pico de reserva, con el consiguiente ahorro de costes y reducción de emisiones de gases.

Otro tipo de medidor inteligente es conocido como PMU (*Phasor Measurements Units*). El PMU es también un SM, sin embargo reservaremos el concepto de *smart meter* para el dominio de los consumidores, mientras que el PMU se ubica tanto en los dominios de distribución como en los de transmisión. Este instrumento es un dispositivo síncrono que muestrean la tensión y la corriente (con sus correspondientes mediciones de fases) en puntos significativos de la red. Mientras que los equipos convencionales miden, típicamente, una

vez cada 2 ó 4 segundos, para proporcionar información acerca del régimen permanente, los PMUs muestrean alrededor de 30 veces por segundo, para aportar datos acerca del régimen transitorio. De este modo, se pueden detectar sobrecargas y cuellos de botella con más antelación y adoptar las medidas necesarias para prevenir caídas del sistema.

3.4. Arquitectura de comunicaciones para una SG.

Esta sección se centra en caracterizar la arquitectura de comunicaciones necesaria en una SG. La Figura 3.3 muestra los componentes básicos de un sistema de comunicaciones incluyendo la terminología utilizada para definir los múltiples segmentos de red y los puntos de demarcación, que tienen un rol clave para una adecuada interoperabilidad. Además se aprecia una definición de acuerdos de nivel de servicio (SLA) y el cumplimiento de métricas de rendimiento de cada una de las interfaces. Esta segmentación ofrece un enfoque modular y flexible que permite definir los segmentos de interoperabilidad entre dominios, optimizando las actividades de gestión y operación.

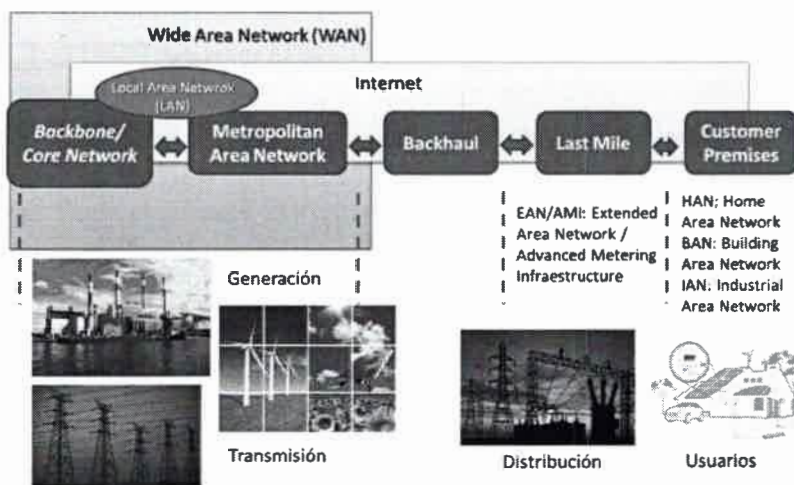


Figura 3.3. Arquitectura de una red de datos para la SG.

A continuación se presentan los elementos básicos de esta arquitectura:

- **Customer Premise.** Una vivienda individual, un edificio y una empresa, requiere respectivamente una HAN (*Home Area Network*), una BAN (*Building Area Network*) o una IAN (*Industrial Area Network*). Para simplificar este documento agruparemos estos tres conceptos en HAN. Este tipo de redes se caracteriza por ser de corto alcance. Al combinar las HAN con la infraestructura AMI los consumidores podrán monitorizar su uso de energía a través de pantallas instaladas en sus hogares o programar sus dispositivos electrónicos en función del precio de la energía. Estas redes también están conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como los PEV (*Plug-In Electric Vehicle*), fuentes de energía renovable (solar / eólica) y dispositivos de almacenamiento.

- **Última milla (*last mile*).** Son redes de comunicaciones bidireccionales inalámbricas o cableadas que se superponen al sistema de distribución de energía, dando conectividad al consumidor final. El éxito de una *Smart Grid* estará determinado por la capacidad de la red de distribución para soportar cambios en los procesos de negocio que resultan de metas como la eficiencia energética, la respuesta de la demanda, de las exigencias regulatorias, así como de la posibilidad de integración de recursos distribuidos. En el segmento de última milla se pueden definir las redes EAN y FAN además de la infraestructura AMI, según las características del sistema de red del proveedor de servicios, el tipo de servicios ofrecidos, la topología de red, la demografía y la tecnología utilizada por el proveedor.
- **Backhaul.** Es el sistema que conecta la red WAN a la red de última milla. Agrega y transporta datos de la red de telemetría de los usuarios finales (es decir los datos relevados por los medidores y aplicaciones), parámetros críticos de control de las subestaciones e información de campo de los dispositivos de la red de distribución.
- **Wide Area Networks (WAN).** Cubren áreas más amplias y por lo general integran varias redes de menor tamaño, que usan diferentes sistemas de comunicación. Se componen de la red de núcleo o red troncal y de la red de área metropolitana (MAN), que en conjunto conectan la mayoría de los servicios de las redes troncales de los distintos proveedores de servicio a lo largo de las líneas de transmisión eléctrica de alta potencia –o usando radioenlaces–. La elección de una u otra tecnología depende de factores como la confiabilidad, el costo, la seguridad y la infraestructura disponible.

Una *Smart Grid* combina una gran variedad de tecnologías (cableadas e inalámbricas) las cuales pueden interconectarse fácilmente. Sin embargo para garantizar la convergencia es necesario que todas estas tecnologías utilicen un protocolo unificador en las capas superiores. Existen dos grandes tendencias en cuanto a la elección de este protocolo, por un lado se propone el tradicional esquema utilizado por Internet (IP, *Internet Protocol*) en su versión 4 y 6, mientras que una fuerte corriente impulsada en España busca sustituir este protocolo por uno denominado UETS.

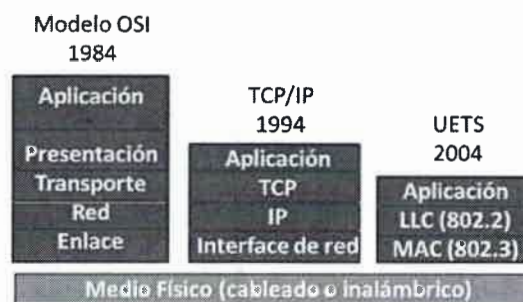


Figura 3.4. Comparación de modelos.

En la Figura 3.4 se puede apreciar la evolución y estructura de los protocolos mencionados. Si bien el modelo TCP/IP es el que se encuentra actualmente en uso siendo la piedra fundamental de lo que hoy conocemos como Internet, el mismo fue implementado en 1994, basándose en el modelo OSI (1984) [61], es decir que tiene casi 30 años. En el momento de su puesta en marcha no se contaba con la electrónica y potencial de procesamiento necesario para adaptar las señales transmitidas en los diversos medios físicos (cables de cobre, fibra óptica, medios inalámbricos, etc...) por lo que la confiabilidad debía ser garantizada con el agregado de capas. Esto reduce la eficiencia del sistema ya que cada capa agrega información que el usuario y/o la aplicación no necesitan. Además el modelo TCP/IP en su versión 4 está al borde del colapso, por lo que ya las mayorías de las aplicaciones se diseñan buscando compatibilizarse con la nueva versión 6. Por otro lado UETS es un protocolo joven, el cual reduce significativamente el número de capas, apoyándose en la confiabilidad que brindan las nuevas tecnologías de comunicaciones encargadas de interactuar con el medio físico. Independientemente de cuál de estas dos tecnologías se imponga, es importante destacar que el estudio realizado en este documento es independiente de este resultado, ya que como se mencionó con anterioridad las nuevas tecnologías pueden adaptar al medio físico tanto protocolos UETS como IP (en sus dos versiones).

En conclusión, si bien UETS presenta muchas ventajas sobre IP, no posee una gran difusión y estandarización lo que seguramente impactará en los costos de los dispositivos, generando una barrera natural para su masificación en el mercado.

3.5. Requisitos de comunicaciones para el diseño de una SG.

La automatización del sistema eléctrico requiere un alto rendimiento del sistema de comunicaciones, es decir un fuerte control en la calidad de servicios ofrecida (QoS, *Quality of Services*), para el manejo en tiempo real de la información. La seguridad de esta red es también otro requisito crucial a tener en cuenta durante la elección y despliegue de una SG.

La infraestructura de comunicaciones requerida en todos los dominios, desde la generación hasta la distribución, deberá ser bidireccional, confiable, baja latencia y de gran capacidad para soportar múltiples utilidades y el mayor número de usuarios posibles, facilitando así la interoperabilidad entre aplicaciones. Por otra parte, el sistema de seguridad debe ser lo suficientemente robusto como para evitar ataques cibernéticos y proporcionar estabilidad al sistema. A continuación se presentan los principales requisitos de comunicaciones para una red eléctrica inteligente.

3.5.1. Fiabilidad, robustez y disponibilidad.

El constante crecimiento de la demanda energética y la acentuación de los picos de consumo en determinadas horas del día, son las principales razones que reducen la fiabilidad de la red. Las nuevas tecnologías de comunicaciones, en conjunto con el nuevo hardware disponible y los sistemas embebidos utilizados en dispositivos electrónicos inteligentes (IED, *Intelligent*

Electronic Device) cumplen una función vital en el aumento de la fiabilidad del sistema. La robustez y disponibilidad de la infraestructura de comunicaciones depende estrechamente de la tecnología utilizada. Las soluciones inalámbricas poseen limitaciones de capacidad como también en la seguridad, sin embargo suelen ser una buena elección para despliegues de gran escala, principalmente por su rápida implementación y bajos costos, así como su robustez frente a caídas de enlaces en topologías malladas [26]. Por otro lado, las tecnologías cableadas son la contraparte tanto de los beneficios como de las falencias de las inalámbricas (altas capacidades, mayor nivel de seguridad; aunque las implementaciones suelen ser mucho más costosas). Para garantizar confiabilidad, disponibilidad y robustez en la SG, manteniendo costos aceptables que fomenten su rápida implementación, se deberán diseñar sistemas híbridos de comunicaciones (*hybrids wireless-wired communications systems*) capaces de integrarse de forma escalable a la red.

3.5.2. Escalabilidad.

El problema que afrontan la mayoría de los proyectos es el crecimiento. La fase de crecimiento y expansión puede ser crítica para cualquier sistema e incluso amenazar su futuro. La escalabilidad es precisamente la capacidad del sistema (y también del modelo de negocio) para crecer y aumentar el valor de los servicios agregados sin que ese crecimiento suponga un aumento, exponencial o en escalón, de los gastos y de la inversión.

La escalabilidad de un sistema requiere un pensamiento cuidadoso desde el principio de su desarrollo, ya que de no ser así la evolución del desarrollo se verá afectada arrastrando problemas que a menudo llegan a ser una carga demasiado pesada para el crecimiento del proyecto.

3.5.3. Calidad de servicios.

Los requisitos de calidad de servicio por lo general incluyen un control sobre parámetros tales como la demora media, *jitter* y la probabilidad de interrupción de conexión. Estos puntos son importantes para describir la dinámica probabilísticas del sistema. El problema ligado al alto costo computacional necesario para el control de calidad, queda desligado de este análisis dado el estado actual de la tecnología, limitándonos solo a trabajar sobre medios de comunicaciones capaces de cumplir con los requisitos impuestos.

En primer lugar, en el diseño de la red inteligente se deberá poner especial atención en la caracterización del tráfico, identificando los servicios prioritarios. Si la infraestructura de comunicaciones es compartida con una empresa que brinda otro tipo de servicios (tales como internet, *streaming*, etc...) será necesario definir no solo reglas de QoS y protocolos de enrutamiento dedicados, sino también pactar políticas de seguridad y acciones de monitoreo que garanticen los requisitos mínimos e indispensables. Por otra parte las tecnologías empleadas poseen diferentes formas de implementación de QoS, por lo que en una red heterogénea en donde conviven tecnologías cableadas (ADSL o PLC) e inalámbricas (GSM,

WiFi, 3G o WiMAX) la determinación y coordinación en la calidad de servicio prestada, juega un rol primordial para el correcto funcionamiento de la red, en especial en las tecnologías inalámbricas, debido a que los esquemas de múltiples accesos (necesarios para operar con grupos de usuarios en simultáneo) producen importantes degradaciones en los rendimientos del sistema.

3.5.4. Seguridad.

Hasta el momento, la seguridad en la información dentro de la infraestructura tradicional de la red eléctrica se ha centrado en identificar y proteger elementos puntuales y numerables, ubicados en centrales térmicas y/o nucleares, líneas de alta tensión y los grandes centros de transformación. La protección de los mismos se realiza tanto aplicando medidas físicas como lógicas (firewalls, segmentación de red, etc.). Sin embargo el cambio de paradigma hacia la SG hace de esas protecciones insuficientes. En este nuevo escenario toda la SG, en su conjunto, es la infraestructura crítica. El número de elementos crece exponencialmente y el dinamismo que la red pretende brindar es un inconveniente más que se agrega esta problemática.

El principal elemento en el dominio de los usuarios finales dentro de esta nueva redes el *Smart Meter* (SM). Estos medidores inteligentes introducen la posibilidad de transmitir continuamente las mediciones realizadas, permitiendo tanto a la compañía eléctrica como a los usuarios, cuantificar el consumo en tiempo real. Además abre el camino a la empresa distribuidora para ofertar nuevos servicios como la contratación prepago o implementaciones de precios diferenciados según el horario de consumo (*TOU pricing, Time of Use pricing*). Esta alta exposición de los usuarios finales y el manejo de información sensible, hace que los SM sufran revisiones constantes de seguridad. En las jornadas del *Black Hat USA* en 2009, Mike Davis (miembro de IOActive) demostró el riesgo de ejecución de código remoto en SM, y además presento una simulación en un entorno controlado de un "gusano" capaz de extenderse de manera autónoma entre los medidores inteligentes. El FBI está trabajando actualmente en un documento encargado de relevar las principales vulnerabilidades detectadas en una SG, el mismo se titula: "*FBI Smart Meter Hacks Likely to Spread*" [99]. Dicho informe reconoce la existencia documentada de casos donde grupos organizados ofrecen por precios entre 300 y 1000 dólares la manipulación fraudulenta de SM para que reporten consumos inferiores a los reales, dicha reprogramación se realizaría sin alterar físicamente el dispositivo simplemente reprogramándolo mediante el uso de un puerto de servicio de tecnología óptica propietario en el SM.

3.6. Métricas para la planificación y evaluación de una infraestructura de comunicaciones en una SG.

Las métricas utilizadas para evaluar requisitos de comunicaciones asociados a una SG, juegan un papel importante en la determinación y elección de tecnologías de transporte de

información. Definirlas no es una tarea fácil, sobre todo si tenemos en cuenta que dependen del tipo de aplicaciones que se implementará dentro de la red. Sin embargo, cualquier sistema de comunicaciones posee dos instancias de diseño: Diseño de enlace (*Link Level*) y Diseño del sistema de múltiple acceso (*System Level*). El primero tiene en cuenta el comportamiento de un enlace directo entre el cliente y la estación de control, mientras que el segundo tiene en cuenta los esquemas y protocolos utilizados para regular el uso de un medio compartido entre múltiples usuarios. Podemos caracterizar las principales métricas agrupándolos en estas dos categorías como se muestra a continuación:

- *Link Level*: Capacidad máxima de transmisión de información (*Throughput*), Latencia (*Latency*) en la comunicación, Cobertura y la Confiabilidad del enlace (*Reliability*).
- *System Level*: Perfil del tráfico, Esquemas de múltiple acceso (incluyendo análisis de interferencia entre usuarios y estaciones base y esquemas de reúso de frecuencias).

En las siguientes subsecciones se explayarán estos conceptos sujetos a las restricciones que actualmente necesitan las aplicaciones de mayor trascendencia en una SG. Luego, en los capítulos VI y VII, se realizará un análisis numérico con mayor profundidad de los mismos.

3.6.1. Capacidad máxima de transmisión.

El *Throughput* indica la tasa efectiva de transmisión de información útil. Se expresa en bits/segundos (bps). Por ejemplo el *throughput* necesario en sistemas SCADA tradicionales oscila entre los 75-2400 bps por dispositivo; mientras que en aplicaciones AMI, DA y/o RTP se encuentra entre 10 y 100 kbps por medidor [27].

3.6.2. Latencia.

Se define como el tiempo que tarda un dato en estar disponible desde que se realiza la medición. Existen diferentes técnicas de medición de latencia que se utilizan según la necesidad y precisión que se desea obtener del cálculo. En cuanto a los requisitos de latencia, los mismos varían desde menos de 10ms para aplicaciones de tele-protección; alrededor de 20 ms para algunas aplicaciones de sincronización de fases en las líneas de tensión, 100 y 200 ms para aplicaciones de voz sobre IP (VoIP), y hasta varios segundos (valores por encima de los 1000 ms) para sistemas de medición inteligente [8].

3.6.3. Cobertura y Confiabilidad.

La cobertura se define como el área geográfica que una estación de telecomunicaciones puede brindar servicios de manera confiable. Si bien este término suele aplicarse a las comunicaciones radioeléctricas, podemos emplearlo también en cualquier tipo de infraestructura, incluyendo las cableadas.

La Confiabilidad del enlace requiere que la Relación Señal Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) sea mayor que un determinado umbral, necesario para garantizar una calidad de servicio aceptable, durante un cierto porcentaje del tiempo en el que el enlace está activo. Esta relación varía principalmente a causa de fenómenos ambientales. Por ejemplo, garantizar una disponibilidad de un 99.99% implica que el enlace podrá estar indisponible solo 53 minutos al año.

3.6.4. Perfil de tráfico y datos.

La caracterización del tráfico que una SG deberá cursar es uno de los parámetros cruciales a la hora de diseñar un sistema de comunicaciones. En función de este punto se fijarán los requisitos mínimos que una tecnología determinada deberá cumplir.

El vínculo con el tipo de aplicación (en tiempo real, off-line, prioritarias, etc) es tan directo, que el diseñador debe tener una visión a futuro para que el sistema pueda soportar variaciones de las mismas sin la necesidad de migrar a otra solución.

Este trabajo busca describir el tráfico de una infraestructura AMI compuesta por múltiples SM, por lo que a continuación se presenta una tabla que enumera los aspectos más relevantes para la caracterización de tráfico de un SM [28].

TABLA 3.1. Caracterización de los mensajes a transmitir.

Mensaje / Descripción del tráfico	Tamaño en Bytes	Intervalo de ocurrencia	Unidad del intervalo	Retardo esperado (latencia)	Sentido de la Comunicación
Lectura de datos	480	288*	x día	0.1 – 5 seg.	Up
Notificaciones	64	26	x semana	5 seg.	Up
Pedido de desconexión / reconexión.	20	1	x día	2 seg.	Down
Respuesta de desconexión / reconexión.	500	1	x día	2 seg.	Up
Sincronización	64	1	x día	2 seg.	Up/Down
Actualización del Firmware.	50000	1	x año	Mejor esfuerzo	Down
Aceptación del pedido de actualización	20	1	x año	Mejor esfuerzo	Up

* Cada 5 minutos.

3.6.5. Esquemas de Acceso.

Los esquemas de acceso han permitido a los sistemas de comunicaciones dar cobertura a múltiples usuarios de forma simultánea. Si bien la mayoría de estas representaciones se dan cuando el medio de transmisión es un medio compartido, como sucede en los sistemas

inalámbricos, cualquier SG en alguno de sus niveles de implementación deberá utilizar un esquema de acceso.

Dentro de los sistemas de acceso podemos mencionar los 2 más implementados en la actualidad: esquemas de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y los de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*). Este último posee una variante que ha cobrado gran importancia en los últimos 10 años, se la conoce como *Orthogonal* FDMA (OFDMA) y es utilizada por la mejora que presenta desde el punto de vista de eficiencia espectral.

Particularmente este trabajo tratará con especial atención este apartado en los siguientes capítulos, ya que es un punto crítico y limitante en el diseño de cualquier solución inalámbrica.

3.7. Comunicaciones Inalámbricas en una SG.

Presentado ya el modelo conceptual para la infraestructura de medición avanzada y las métricas que caracterizan a un sistema de comunicaciones, se procederá a justificar la elección de la tecnología a utilizar.

Una de las características más relevante en una transmisión inalámbrica radica en la conectividad sin necesidad de una conexión física entre los nodos. Esto facilita el rápido despliegue, reduce las obras civiles y por ende los costos de infraestructura. Además las nuevas tecnologías permiten desarrollar topologías cooperativas, aumentando la redundancia en los canales de comunicación haciendo a la red más confiable [29, 30 y 31]. Sin embargo es importante estudiar algunos aspectos críticos de estas tecnologías:

1. Problemas de interferencia electromagnéticas con las líneas de transmisión y distribución de potencia.
2. Caracterización del canal de comunicaciones.
3. Técnicas eficientes de modulación para sistemas inalámbricos.
4. Evaluación de tecnologías capaces de gestionar múltiples usuarios satisfaciendo los requisitos de comunicación previamente planteadas
5. Seguridad de la información.

En respuesta al punto “1”, las descargas entre líneas de energía por debajo de 70 kV (incluyendo el efecto corona que surgen en las líneas de más de 110 kV), tienen contenido espectral de significancia en el intervalo de 10 - 30 MHz [32], por lo que no representan un problema para la mayoría de las tecnologías inalámbricas que comercialmente se utilizan en otros ámbitos, debido a que las mismas se encuentran muy por encima de estos límites. En segundo lugar se debe realizar una correcta estimación del canal de comunicaciones inalámbrico para poder minimizar los efectos adversos al que somete a la transmisión. Este proceso conlleva a un estudio acerca de las técnicas de modulación/codificación a utilizar y los esquemas de gestión de múltiples usuarios que deberán implementarse. Finalmente, dado

que el medio de transmisión es de libre acceso al público, debe prestarse especial cuidado a la seguridad, tanto de la información sensible que se transmite como de ataques que puedan afectar el correcto funcionamiento del sistema.

3.8. Conclusiones.

En este capítulo se presentaron una serie de pasos que permiten diseñar y analizar una infraestructura de comunicaciones para una red inteligente. En primer lugar se mostró un modelo multi-capa diseñado por *Sonoma Innovation* el cual se combina con los modelos de interoperabilidad, que el NIST ha indexado, para el desarrollo e implementación de sistemas de comunicaciones en una SG.

Dada la diversidad en aplicaciones disponibles para una SG se procedió a focalizarse solo en el estudio de una Infraestructura Avanzada de Mediciones (AMI), tal como pudo apreciarse en la Figura 3.2, ya que se considera que la rápida implementación de la misma aportaría información de crucial importancia a corto plazo para mejorar la eficiencia de la red eléctrica.

Se definieron los requisitos básicos que se esperan de una red de datos para el soporte de aplicaciones en una AMI, tales como robustez, fiabilidad, calidad del servicio, seguridad, etc., así también como los criterios y métricas de planificación y evaluación para este tipo de infraestructuras.

El modelo conceptual de la solución de la que esta tesis se ocupa ha quedado plasmado en todo su espectro en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3. De esta conjunción surgirá, en los siguientes capítulos, la justificación técnica para el sistema de comunicaciones adoptado para despliegues de *Wireless AMI*.

CAPÍTULO IV

TECNOLOGÍAS Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID.

4.1. Introducción.

Disponer de información fiable y en tiempo real de los puntos de generación así como de toda la red de transmisión y distribución, es un punto crítico para garantizar un suministro confiable de energía a los usuarios finales. El impacto de las fallas en los equipos, las limitaciones de capacidad, y los accidentes / catástrofes naturales, provocan grandes perturbaciones de energía, llegando incluso hasta apagones masivos, que podrían evitarse en gran parte por el monitoreo continuo en las líneas de alimentación, el diagnóstico temprano de fallas y la operación remota de protecciones. Esta es la principal razón por la que el monitoreo y control inteligente utilizando nuevas tecnologías de información [26], [33].

El rol de las tecnologías de comunicaciones para el intercambio de información entre las nuevas aplicaciones será la clave para el desarrollo de la futura red. Sin embargo para que el despliegue de la *Smart Grid* sea extenso, brindando cobertura a la mayor área geográfica posible, se necesitará una red heterogénea compuesta por un sin números de estándares (tanto alámbricos como inalámbricos) que convivan perfectamente interconectados. Esto se logrará solo si se garantiza la convergencia de los protocolos a una interface común.

La Figura 4.1 presenta las diversas tecnologías disponibles para interconectar aplicaciones de una red inteligente.

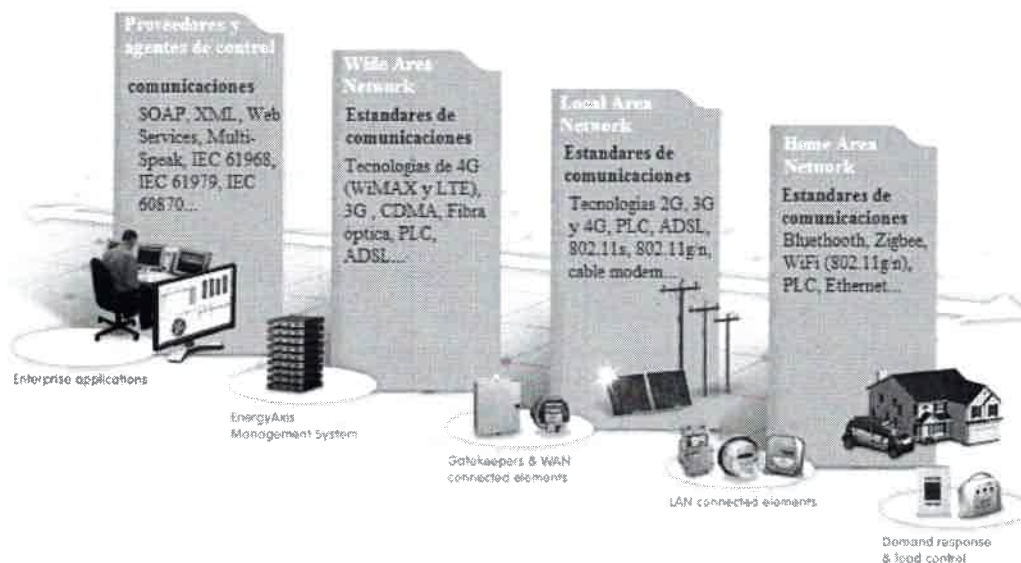


Figura 4.1. Tecnologías disponibles para la SG.

Se puede apreciar en dicha ilustración una nueva forma de dividir a la red eléctrica en función de sus nuevos requisitos de comunicaciones (inherentes al uso de nuevos servicios, tales como mediciones en tiempo real, facturación dinámica, etc.):

- Proveedores y agentes de control: Son el cerebro de la red, en donde se intentará nuclear la mayor cantidad información del sistema. Sin embargo esto no impide la utilización de una inteligencia descentralizada a cargo de nodos de menor jerarquía.
- *Wide Area Network* (WAN): Es el término utilizado para denotar redes de información que brindan servicios a una zona geográfica muy amplia (algunos trabajos los encuadran en radios entre 100-1000 km). Estas redes se caracterizan por manejar tráficos elevados de datos y esquemas complejos de enrutamiento y acceso, esto se debe principalmente a que engloban a un gran conjunto de otras redes, las cuales se mencionarán a continuación. Los *backbone* de información suelen transmitir tasas superiores 40 Mbps, mientras que en los centros de datos y principales centros de operación las velocidades pueden llegar al orden de los Gbps.
- *Local Area Network* (LAN): En este caso la zona de cobertura oscila entre 100m a 300m. Sin embargo este límite es subjetivo, existen redes LAN que pueden alcanzar radios superiores a 5km. El tipo de tráfico puede variar desde 10 Mbps hasta 100 Mbps.
- *Home Area Network*: Limitan su alcance a radios inferiores a 30m, las tasas de información requeridas no superan los 10Mbps. Este tipo de redes está muy orientado a la domótica hogareña, entre otros aspectos.

Además de los diversos programas de investigación y desarrollo que realizan países como U.S.A., China o integrantes de la Comunidad Europea, muchas empresas eléctricas están tomando medidas adicionales para convertir el concepto de la “red inteligente” en una realidad. El primer paso que dichas empresas han realizado consiste en firmar acuerdos con los operadores de telecomunicaciones o proveedores de servicios para llevar a cabo proyectos de redes inteligentes en pequeñas ciudades o ámbitos fáciles de controlar, tales como universidades, edificios o barrios privados. Todos estos acuerdos deben definir con la mayor precisión posible los principales requisitos y características para la infraestructura de comunicaciones necesaria en una AMI [33].

En el contexto del desarrollo de esta tesis, el presente capítulo cumple 2 funciones, que serán utilizadas más adelante como criterios de elección y evaluación de la infraestructura propuesta:

1. Presentar al lector de manera comparativa las diversas soluciones en cuanto a tecnologías de comunicación disponibles en la actualidad.
2. Presentar Protocolos de comunicación orientados a aplicaciones concretas dentro de una red inteligente.

4.2. Tecnologías de comunicación disponibles.

Como se ha estudiado, la “red inteligente” busca integrar diversas tecnologías y protocolos. Esto generará una gran cantidad de información procedentes de diferentes aplicaciones, la misma será utilizada para el análisis y control en tiempo real de fallas, consumo y hasta regímenes tarifarios. Por lo tanto, es muy importante para las empresas eléctricas encontrar la mejor infraestructura de comunicaciones para manejar los datos de forma confiable, segura y rentable.

La primera gran clasificación de tecnologías de comunicaciones se centra en dividir las en 2 grandes categorías: Cableadas e Inalámbrica. En algunos casos, las comunicaciones inalámbricas tienen algunas ventajas sobre las tecnologías cableadas, como infraestructura de bajo costo y la facilidad de conexión a las zonas difíciles o inalcanzables. Sin embargo, la naturaleza del canal inalámbrico suelen causar importantes atenuaciones en las comunicaciones (en el Anexo I se detalla el modelado de este tipo de canales). Por otro lado, las soluciones con cable son menos susceptibles a este tipo de interferencia además que presentan una mejor eficiencia en cuanto al consumo de las interfaces utilizadas para interconectar la red de datos.

Básicamente, existen dos tipos de flujos de datos que circularán por la red. El primer flujo es el de los sensores y electrodomésticos hacia los medidores inteligentes domésticos, mientras que el segundo fluye desde medidor es hacia los centros concentradores de datos. El primer caso puede resolverse utilizando el mismo tendido eléctrico, esta tecnología se la conoce como *Power Line Communication* (PLC) o también se pueden utilizar tecnologías inalámbricas de corto alcance, tales como ZigBee, 6LowPAN o Bluetooth, entre otros. Para el segundo tipo de flujo, pueden re-utilizarse las ya desplegadas soluciones celulares (de tercera y cuarta generación –conocidas como redes 3G y 4G) o de Internet (tales como infraestructuras Telefónicas, Fibra Óptica y radio-enlaces dedicados).

Los factores limitantes a tenerse en cuenta para el proceso de despliegue de una infraestructura de medición inteligente son,

- Tiempo de implementación
- Costos de operación
- Disponibilidad de la tecnología
- Escenario de implementación(rural / urbano o de interior / al aire libre, etc)

La elección de una tecnología que se adapte a un entorno particular puede no ser adecuado para otro ambiente. A continuación, se presentan algunas de las tecnologías de mayor renombre, junto a sus ventajas y desventajas.

4.2.1. ZigBee.

ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para ser utilizada en redes de sensores. La tasa de transmisión de datos es mucho más baja que la mayoría de las tecnologías disponibles, sin embargo este estándar posee importantes ventajas debidos al bajo consumo eléctrico (haciendo posible su uso con baterías por largos periodos de tiempo), bajo costo y fácil integración con otros dispositivos electrónicos.

Esta tecnología es ideal para, por ejemplo, infraestructuras de iluminación inteligente, control de consumo de energía en dispositivos, automatización del hogar, etc. El NIST recomienda el uso de esta tecnología para el despliegue de redes en el dominio residencial (es decir en los hogares) [34]. Actualmente, existe una variante conocida como *ZigBee Smart Energy Profile* (SEP) con funcionalidades extras al tradicional.

Ventajas: ZigBee tiene 16 canales en la banda de 2,4 GHz, cada uno con 5 MHz de ancho de banda. La potencia máxima de salida es 0 dBm (1 mW). El rango de cobertura oscila entre 1 y 50 m, dependiendo de las condiciones del canal, con una velocidad de transmisión de 250 Kbps utilizando la modulación OQPSK (*Offset QPSK*) [34]. ZigBee es considerado como una buena opción para la medición y gestión de energía y es ideal para implementaciones de redes de corto alcance debido a su simplicidad, movilidad, robustez, bajos requisitos de ancho de banda, bajo costo de implementación, su funcionamiento dentro de un espectro sin licencia aplicación. El estándar que rige esta tecnología es el IEEE 802.15.4 [35]. Por otro lado ZigBee SEP también tiene algunas ventajas ya que está orientado para la medición de gas, aguay servicios de electricidad, tales como control de carga, aplanamiento de la respuesta de la demanda, programas de fijación de precios en tiempo real y sistema de supervisión [34], [36].

Desventajas: Hay algunas restricciones en los dispositivos comerciales que se encuentran disponibles para implementaciones ZigBee, tales como su baja capacidad de procesamiento, limitantes de memoria, interferencias con otros dispositivos electrónicos que comparten la mismo medio de transmisión en la misma banda de frecuencias liberada (que va desde las redes de área local inalámbrica IEEE 802.11, Bluetooth y Microondas [34]). Todo esto aumenta la posibilidad de corromper el canal de comunicación y por ende degradar el enlace [37].

4.2.2. Redes Inalámbricas Malladas.

Se define a una red mallada (WMN, *Wireless Mesh Network*) como una arquitectura y no un protocolo, en donde todos los nodos que la componen se encuentran interconectados de manera inalámbrica con todos sus nodos vecinos, generando así múltiples caminos de

comunicaciones para alcanzar cualquier destino dentro la red. Múltiples tecnologías soportan este tipo de topología, incluyendo la mayoría de las que serán tratadas en esta tesis.

Las redes *mesh* presentan las siguientes características que las distinguen frente los otros tipos de redes inalámbricas:

- Fácil despliegue: Este tipo de redes son auto configurables lo que permite incluir nuevos nodos sin incurrir en el re planeamiento global de la red. El hecho que este tipo de redes sea auto configurables hace que sean una solución ideal de conectividad de respaldo en situaciones de catástrofe.
- Auto regenerables (*self healing*): Si se produce una baja masiva de nodos la red tiene la capacidad de modificar de la mejor manera su topología para continuar proveyendo servicio.
- Robustez: En una red *mesh*, un dispositivo cuenta con más de un enlace alternativo (redundancia) para comunicarse con otro equipo. Esto hace que las redes malladas sean muy robustas ya que para que un nodo permanezca incomunicado se debe producir una falla simultánea en todos los enlaces que lo comunican con la red.

Un claro ejemplo de implementación exitosa de esta solución es el de la empresa PG & E, la cual ha instalado “*Smart Meters*” equipados con un módulo de radio. Cada uno de estos dispositivos dirige los datos de medición a través de los medidores vecinos. Este proceso convierte a cada medidor como repetidor hasta que los datos recogidos alcanzan un punto de acceso a la red de datos privada o Internet [38].

Ventajas: WMN es una solución escalable de comunicaciones para una infraestructura de mediciones avanzadas, automatización y control brindando cobertura en ciudades densamente pobladas. De bajo coste, fácil implementación y gran robustez, las redes WSN se encuentran actualmente contempladas por varias estándares tales como IEEE 802.11s, 802.16, ZigBee, etc.

Desventajas: Desde el punto de vista de eficiencia en capacidad de transmisión este tipo de redes presentan serias dificultades (propias de la redundancia) por ende las velocidades de transmisión son muy bajas. Por otro lado, el uso de bandas de frecuencia no licenciadas obligan a trabajar en un espectro muy pululado (si tenemos en cuenta un ambiente urbano). La latencia de la comunicación se ve incrementada por el número de saltos (repetidores) que debe atravesar la información hasta alcanzar un punto de acceso.

4.2.3. Redes Celulares.

Las redes celulares pueden ser una buena opción para la comunicación entre medidores inteligentes y empresas prestadoras de servicios. La infraestructura de comunicaciones

existente reduce sustancialmente los costos operativos y tiempos implementación. 2G, 2.5G, 3G, WiMAX y LTE son algunas de las tecnologías celulares disponibles para desarrollar una infraestructura avanzada de medición.

El uso de redes celulares como soporte de comunicaciones para una *Smart Grid* ha tenido una gran difusión en los últimos 3 años. Por ejemplo, la empresa *Networked Energy Services de Echelon* (NES) ha utilizado los servicios de la compañía de telefonía móvil T-Mobile (particularmente GSM, *Global System for Mobile Communications*, tecnología 2G) para el despliegue de sus sistema de tele-medicación, sin la necesidad de una inversión en una nueva red de comunicaciones dedicada. Por otro lado, compañías como Telenor, Telecom Italia, China Mobile, Vodafone también han acordado poner su red GSM disponible para el flujo de datos provocado por los sistemas de medición inteligente. Un poco más avanzado, los *Smart Meters* de Itron SENITEL emplean tecnología GPRS (*General Packet Radio Service*) para realizar las transacciones hacia los puntos de control y operación. También a nivel nacional, podemos citar a EDENOR como una de las empresas que utiliza tecnología GPRS para realizar tele-medicación de medidores inteligentes.

Por otro lado gracias a tecnologías tales como los acceso múltiple por división de códigos (*Code Division Multiple Access*, CDMA), CDMA de banda ancha (*Wideband CDMA*), y *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) se ha podido aumentar significativamente las velocidades de transmisión y mejorar la gestión de la red dando origen a las tecnologías celulares de tercera generación (3G). Verizon, una de las empresas de telecomunicaciones líderes de los Estados Unidos, ha propuesto utilizar a CDMA-UMTS como columna vertebral para garantizar las comunicaciones en las redes inteligentes [38].

Siempre en busca de mayores velocidades de transmisión, mejor manejo de usuarios y garantías en la calidad del servicio prestado, mejorando la cobertura en ambientes urbanos (es decir entornos con poca línea de vista entre transmisores y receptores), las redes móviles han evolucionado a una cuarta generación (4G) de tecnologías. Actualmente WiMAX y LTE (*Long Term Evolution*) son las dos principales soluciones que se encuentran disponibles en el mercado para implementaciones 4G. SP AusNet, empresa australiana, ha escogido a la tecnología WiMAX como soporte de comunicaciones en sus AMI. En EE. UU., Sprint Nextel, ha firmado un acuerdo con uno de los más importantes proveedores de software para redes inteligentes, Net Grid, en un proyecto que busca facilitar la comunicación entre los medidores y puntos de control sobre una red inalámbrica 4G. General Electric (GE), en colaboración con Red Net, Motorola e Intel, está desarrollando medidores basados en la tecnología WiMAX para *Center Point Energy* (compañía de suministro de energía doméstica que incluye la transmisión y distribución eléctrica, distribución de gas natural entre otros servicios). Por otra parte, algunas empresas importantes, como Cisco, Silver Springs Red y Verizon, también implementan WiMAX para aplicaciones en red inteligente. El más grande proveedor del mundo de WiMAX, Alvarion, ha anunciado su asociación con la *National Grid*, empresa EE.UU. En cuanto a la tecnología LTE, si bien es mucho más

promisoria que WiMAX, las implementaciones se han retrasado principalmente por la tardanza en la estandarización.

Rápido despliegue, bajos costos de infraestructura y mantenimiento, seguridad adecuada en los protocolos, altas velocidades de datos (hasta 75Mbps), y operación en bandas de frecuencias libres como propietarias, son los puntos que hacen a las tecnologías 4G la solución con mayor aceptación en el mercado de las comunicaciones en una *Smart Grid*.

Ventajas: La red celular está ampliamente difundida garantizando excelentes niveles de cobertura. La infraestructura existente permite ahorrar costos y agilizar los procesos de implementación. En sus 20 años de uso masivo, las redes celulares han demostrado una flexibilidad admirable en la migración a nuevas tecnologías, mejorando no solo capacidad sino también confiabilidad de los enlaces y sobre todo la seguridad en la comunicación.

Desventajas: Los servicios de telefonía móvil son compartidos por múltiples usuarios, es decir no son exclusivos a la SG. Compartir este recurso puede dar origen a importantes congestiones que impacten directamente en la calidad del servicio prestado. Sin embargo este problema no es un problema asociado solo a las redes celulares sino a cualquier servicio de datos (como se estudiará en el próximo apartado) que no sea dedicado (redes de uso privado). Cabe destacar que esta desventaja es de diseño y no de implementación, pero se la considera negativa ya que el objetivo es utilizar una infraestructura ya desplegada como lo es la red de telefonía móvil.

4.2.4. Digital Subscriber Line (DSL).

DSL es una tecnología de alta velocidad de transmisión de datos que utiliza el tendido telefónico (par de cobre) como medio. El espectro típico que utiliza se encuentra alrededor de 1 MHz por las limitaciones propias del par trenzado de cobre [39]. Al igual que varias tecnologías mencionadas, DSL posee una amplia infraestructura ya tendida que actualmente brinda servicios de telefonía e Internet, lo que reduciría el costo de implementación si se deseara utilizar como soporte de comunicaciones para una red inteligente. Compañías como *Qwest* y *Xcel Energy* han escogido utilizar a esta tecnología de comunicaciones debido, principalmente, a la baja latencia (difícil de alcanzar con tecnologías inalámbricas) y velocidades de transmisión que pueden obtenerse. *Stadtwerke Emden*, empresa estatal de servicios en Alemania, ha firmado un convenio con *Deutsche Telekom*, para realizar mediciones inteligentes utilizando DSL. *Deutsche Telekom* ofrece varios servicios en este proyecto, tales como la lectura de los datos de consumo, instalación y operación de los sistemas y por supuesto el respaldo para la transmisión de los datos [38].

Ventajas: El alto nivel de cobertura en zonas urbanas, la baja latencia y el elevado ancho de banda que dispone esta tecnología la convierte en una fuerte candidata para

el despliegue de una AMI. Además, dada que la infraestructura preexistente se reutilizaría los costos de implementación se reducen significativamente.

Desventajas: La velocidad de transmisión se ve afectada por la distancia a la que se encuentra el cliente del nodo. Este tipo de redes posee un elevado costo de mantenimiento con respecto a las demás tecnologías. Por otro lado esta infraestructura es compartida por los usuarios de los servicios telefónicos y de internet, por lo que la confiabilidad de las comunicaciones se ve comprometida.

4.2.5. Power Line Carrier (PLC).

Esta técnica utiliza la infraestructura eléctrica para la transmisión de datos a altas velocidades. Obviamente en las redes domésticas, esta tecnología es la primera opción para comunicar los dispositivos con el medidor inteligente de debido a su conexión directa con este [37]. PLC está pensado para utilizarse en un principio en las redes de baja tensión para aplicaciones de tipo AMI, sectorizando zonas densamente urbanizadas. Francia ha comenzado con un proyecto denominado “*Linky Meter Project*” que busca remplazar 35 millones de medidores tradicionales por medidores inteligentes Linky utilizando PLC como medio de comunicaciones entre los *Smart Meters* y los concentradores de información, y GPRS entre los concentradores y los centros de control. Por otro lado la empresa italiana de electricidad, ENEI, utiliza el mismo esquema que el mencionado anteriormente en las principales ciudades en donde presta servicios.

Ventajas: Considerando que la red eléctrica es la red más extendida del planeta, la infraestructura preexistente reduce los costos de implementación significativamente. Los esfuerzos que actualmente llevan a cabo diversos grupos de investigación interdisciplinarios en esta tecnología, la pone como uno de los principales tópicos en lo que refiere a medios de comunicación. Las principales aplicaciones en las que se está trabajando están orientadas a redes domésticas (HAN) e infraestructuras reducidas de medición en las líneas de baja tensión.

Desventajas: El canal de transmisión de esta tecnología es un medio extremadamente ruidoso debido a diversas causas electromagnéticas (tales como conexión de cargas, distancia entre transmisores-receptores, etc.), lo que dificulta el modelado de este tipo de canales.

4.2.6. Fibra Optica.

La aparición de nuevos servicios que demandan un gran ancho de banda y a la creciente capacidad que requieren las redes móviles, han llevado a la utilización de medios ópticos como *backhaul* de comunicaciones capaces de soportar estos requisitos. En la actualidad la tecnología ADSL compite con las instalaciones de fibra hasta el hogar en el mercado doméstico y los operadores cada vez ofrecen más soluciones de FTTH (Fiber To The Home)

acompañadas de servicios de valor añadido como televisión de alta definición o a la carta. Como se ha mencionado los medios ópticos son actualmente los que ofrecen mayor capacidad de transmisión con latencias muy bajas.

Las arquitecturas PON (*Passive Optical Network*) son una solución que están adoptando los operadores de telecomunicaciones como una manera de atacar a la problemática de la última milla, puesto que presenta evidentes ventajas:

- Permiten alcanzar usuarios localizados a distancias de hasta 60 Km desde la central (o nodo óptico). Esta distancia supera con creces la máxima cobertura de las tecnologías DSL (máximo 5Km desde la central).
- Minimizan el despliegue de fibra en el bucle local al poder utilizar topologías árbol-rama mucho más eficientes que las topologías punto-a-punto. Además este tipo de arquitecturas simplifica la densidad del equipamiento de central, reduciendo el consumo.
- Ofrecen una mayor densidad de ancho de banda por usuario debido a la mayor capacidad de la fibra para transportar información que las alternativas de cobre (xDSL y CATV)
- Como arquitectura punto-multipunto, las redes ópticas pasivas permiten superponer una señal óptica de Televisión procedente de una cabecera CATV en otra longitud de onda sin realizar modificaciones en los equipos portadores de datos (ver apartado: tecnología VPON)
- Elevan la calidad del servicio y simplifican el mantenimiento de la red, al ser inmunes a ruidos electromagnéticos, no propagar las descargas eléctricas procedentes de rayos, etc.
- En cuanto a la estandarización, existen 3 estándares dominantes: IEEE EPON, ITU-T GPON e ITU-T BPON, los cuales regulan velocidades superiores al orden de Gbps, distancias que oscilan entre 10 y 20 km sin necesidad de regeneración y otros aspectos referidos a la seguridad.

Ventajas: Altas capacidades y bajas latencias, hace de la fibra el medio ilimitado, haciendo viable cualquier tipo de aplicaciones. Los medios ópticos son inmunes a todo tipo de interferencia electromagnética, por lo que permite su adecuación a entornos eléctricos o radio-eléctricos sin ningún inconveniente.

Desventajas: Alto costo de despliegue debido a que la infraestructura preexistente en el dominio de consumidores finales es extremadamente baja. Además existen varios factores que limitan la velocidad de transmisión tales como la distancia, diseño de los cables (mono-modo o multi-modo), factores físicos externos, tipo de fibra óptica, etc. Al aumentar la velocidad de transmisión de las redes ópticas WDM hasta valores de 40 Gbps y superiores, toman importancia las limitaciones debidas principalmente a que el crecimiento de la tasa de transmisión reduce la tolerancia a los siguientes factores:

- Atenuación (dB/Km)
- Dispersión cromática (CD)
- Polarización del modo de dispersión (PMD)

Una visión general de las tecnologías previamente mencionadas se puede encontrar en la Tabla 4.1 que se ilustra a continuación.

TABLA 4.1: Tecnologías de comunicaciones para una Red Inteligente.

Tecnologías	Frecuencia [MHz]	Throughput	Rango	Aplicaciones	
Inalámbricas	ZigBee	868, 915, 2400	250 kbps	10-50 m	AMI - HAN
	GSM/Gprs	900 - 1800	14-170 kbps	1 -10 km	AMI -DR - HAN
	WiFi	2400 y 5800	54 - 300 Mbps	10-100 m	AMI -DR - HAN
	3G	1920-1980; 2110-2170	384 - 2000 kbps	1 -10 km	AMI -DR - HAN
	4G	2400, 3500 y 5800	70 - 1000 Mbps	1-10 km	AMI -DR - HAN
Cableadas	DSL	1-8	2-8 Mbps	1-5 km	AMI -DR - HAN
	PLC	1-30	2-3 Mbps	1-3 km	AMI -DR - HAN - Detección de fallas.
	Fibra óptica	Del orden de los THz	1 - 1,3 Gbps	10-20 km	AMI -DR - HAN

4.3. Protocolos de comunicación para una SG.

En esta búsqueda por alcanzar una red eléctrica más eficiente utilizando un flujo mayor de información en la toma de decisiones, el principal problema radica en la escasez de estándares y normativas que existe en todo lo referido a protocolos y aplicaciones para la “red”. Este punto es crucial porque dificulta la interconexión de los dispositivos desarrollados, tales como medidores y software de gestión, así como la integración de las fuentes de energía renovable. Por lo tanto la adopción y aceptación de estándares que regulen la interoperabilidad de todo el sistema es un requisito fundamental para que la red inteligente se transforme en una realidad.

Si bien este tema se comenzó a tratar en el capítulo anterior, es necesario brindar más detalles tanto de los organismos internacionales que actualmente están trabajando en esta temática, como en los protocolos que ya se encuentran disponibles. Como organismos involucrados se pueden citar los esfuerzos de la “*European Union Technology Platform*”, el ya mencionado NIST, ANSI, IEC, IEEE, ISO (*International Organization for Standardization*), ITU, 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) y KATS (*Korean Agency for Technology and Standards*), entre otras. Sus esfuerzos se focalizan en caracterizar funcionalidades para las

infraestructuras de medición de diversos servicios, así también como definir los requisitos de comunicación de las interfaces, en los principales dominios de aplicación. A continuación, las siguientes subsecciones se dividen clasificando los protocolos empleados/diseñados para cada uno de estos dominios.

4.3.1. Protocolos para Home Area Network (HAN).

HomePlug es un protocolo que permite conectar dispositivos eléctricos entre sí creando una red HAN. Estas redes tienen como punto concentrador el medidor inteligente, el cuál es el cerebro de dicha red. Este protocolo además de monitorear permite tener un control directo sobre los dispositivos gracias a *HomePlug Comand and Control protocol* (HPCC). HomePlug Green PHY es una especificación desarrollada para líneas de baja tensión y costo reducido, optimizada para su utilización en conjunto con el estándar PLC. Esta tecnología ha obtenido una amplia aceptación por las principales compañías de distribución de recursos energéticos tales como *Consumers Energy*, *Duke Energy*, *Pacific Gas and Electric* y *Southern California Edison*. El estándar HomePlug Green PHY requiere bajas tasas de transmisión de datos (haciéndolo flexible para adaptarse a soluciones inalámbricas), soporta redes IP, presenta un bajo consumo de energía y una completa interoperabilidad con los dispositivos de anteriores (versiones HomePlug).

Por otro lado, podemos citar a “**PRIME**”, un estándar abierto, basado en tecnologías PLC que proporciona interoperabilidad para múltiples proveedores. “*Advanced Digital Design*”, “*CURRENT Group*”, “*Landis Gyr*”, “*ST-Microelectronics*”, “*uSysCom*” y “*ZIV Measurements*”, son algunas de las compañías que utilizan PRIME y cuentan con una amplia experiencia en implementaciones con tecnologías *Power Line Communication* y medición inteligente.

G3-PLC es un protocolo de comunicación lanzada por el ERDF y Maxim. Tiene como objetivo proporcionar interoperabilidad, seguridad cibernética y robustez, reduciendo los costos de infraestructura en las implementaciones de redes inteligentes a nivel mundial.

Utility Smart Network Access Port (U-SNAP), básicamente, permite la estandarización de un conector y una interfaz serial e identifica la interfaz de hardware, dimensiones físicas, transferencia de datos, contenido del mensaje y otras especificaciones de protocolo para dispositivos HAN, fomentando la interoperabilidad entre dispositivos (SM) y tecnologías.

El **IEEE P1901 Working Group**, bajo el patrocinio de la *IEEE Communications Society* desarrolló el estándar IEEE P1901 para comunicaciones de alta velocidad en líneas eléctricas para servicios multimediales, servicios públicos y aplicaciones de una *smart grid* [40]. Dicho estándar brinda especificaciones para la capa física y de control de acceso. IEEE P1901 busca integrara la tecnología PLC con las tecnologías inalámbricas logrando mayor cobertura, robustez y velocidad en la transmisión de datos [38].

Z-Wave es una solución alternativa para los problemas de interferencia con 802.11b/g/n que posee ZigBee, ya que opera en el rango de los 800 MHz [37]. Z-Wave no es un estándar abierto. Desarrollado por la Alianza Z-Wave, un consorcio internacional de fabricantes. Las características simples, modulares y de bajo costo hacen de Z-Wave una de las principales tecnologías inalámbricas en la domótica. Esta tecnología puede ser fácilmente incorporada a los aparatos electrónicos de consumo, como la iluminación, el control remoto y sistemas de seguridad que requieren bajo ancho de banda.

4.3.2. Automatización de edificios.

BACnet es un protocolo de comunicaciones que fue desarrollado por la *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineer* (ASHRAE), para la automatización de edificios (habitationales, empresas e industrias) y hogares particulares. BACnet pretende definir la forma en que se representan las funciones que puede hacer cada dispositivo, llamadas "objetos" y cada una con sus propiedades concretas. Este protocolo es una completa herramienta para el diseño, gestión e interconexión de múltiples redes de control distribuido.

4.3.3. Automatización de Subestaciones Eléctricas.

Existen diversos protocolos para la automatización de subestaciones, sin embargo uno en particular ha cobrado gran popularidad en el medio, **IEC 61850**. Este protocolo es muy flexible, facilitando la interoperabilidad e integración de los múltiples actores. IEC 61850 está basado enteramente en "código abierto" por lo que todos los fabricantes pueden acceder a dicho estándar. La norma no solo se ocupa de la automatización de la subestación sino también del equipamiento de potencia de la misma. Utiliza un lenguaje de configuración y un modelo de objetos para describir a los componentes del sistema [41].

4.3.4. Nivel de aplicación de sistemas de gestión energética.

IEC 61970 y **IEC 61968** son dos estándares que proporcionan lo que se llama un modelo de información común (CIM, *Common Information Model*), necesario para el intercambio de datos entre los dispositivos y redes. IEC 61970 fue diseñado para operar en el dominio de Transmisión, mientras que IEC 61968 funciona en el dominio de Distribución. Las normas CIM son parte integral de la implementación de un escenario de red inteligente, en el que muchos dispositivos se conectan a una red única.

OpenADR es un esfuerzo de investigación y desarrollo de normas creado para predecir y controlar de forma automática la respuesta de la demanda energética. Basado en un estándar abierto, independiente de la plataforma y tecnologías de transmisión de datos o sistemas de software. OpenADR fue originalmente desarrollado en el Lawrence Berkeley Labs, por el gobierno de los EE.UU. La adopción de dicho estándar para su uso en la red inteligente es muy importante para ofrecer un despliegue eficaz de fijación dinámica de precios, controlar la respuesta de la demanda, y mejorar así la fiabilidad de la red eléctrica.

4.3.5. Lectura remota de medidores.

ANSI C12.18 es una norma ANSI que está diseñado específicamente para las comunicaciones de dos vías entre los medidores inteligentes de electricidad (dispositivos C12.18) utilizando un puerto óptico.

ANSI C12.19 es un estándar definido para la industria de servicios públicos. Esta norma es brinda una estructura tabular para transmisiones de datos entre un dispositivo final y el centro de control de utilidades en un formato XML. ANSI C12.19 no especifica ningún criterio para el transportar los datos.

M-Bus es un estándar europeo y establece los requisitos para la lectura remota de todo tipo de medidores de servicios públicos. Los medidores de servicios públicos están conectados a un maestro común que periódicamente los consulta. Cuenta con una versión inalámbrica conocida como *Wireless M-Bus*.

4.3.6. Protocolos de Control e Interoperabilidad en las Comunicaciones.

IEEE P2030 es una guía de recomendaciones para garantizar la interoperabilidad (articulación) de las tecnologías de comunicaciones empleadas en una red inteligente con las tecnologías de información que se manejan en sistema eléctrico de potencia. Básicamente, IEEE P2030 se puede entender como un documento único para la interoperabilidad de las redes inteligentes. Este documento es responsable de la transferencia de datos sin problemas de forma bidireccional involucrando todos los dominios (desde la generación hasta la distribución), garantizando el suministro de energía fiable, y el correcto funcionamiento de aplicaciones del lado del cliente. El *IEEE Standards Board*, patrocinado por el Comité de Coordinación de normas IEEE, confirmó el desarrollo del IEEE P2030 como un estándar de interoperabilidad unificador para la red inteligente. En resumen se busca la integración de tecnologías mejorando la comunicación entre la generación eléctrica, la entrega, y los beneficios de uso final, aumentando el conocimiento sobre la arquitectura de la red, para de esta forma proporcionar un suministro eléctrico fiable, flexible y seguro.

ANSI C12.22 es un protocolo para el transporte de los datos del Protocolo ANSI C12.19 buscando mejorar la interoperabilidad entre los módulos de comunicación y los medidores inteligentes mediante. Las comunicaciones utilizan cifrado AES para ofrecer mayor seguridad, integridad y confidencialidad en los datos transmitidos.

ISA100.11a es un estándar abierto para sistemas inalámbricos empleado en la automatización industrial. Desarrollado por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) el ISA100.11a se centra en ofrecer infraestructuras inalámbricas de gran escala, bajo consumo y costo, robustas, seguras y multi-plataforma. La norma ISA100.11a es fácil de usar e instalar y proporciona interoperabilidad con múltiples proveedores.

Las normas ITU-T G.9955 y G.9956 contienen las especificaciones de la capa física y de enlace de datos, respectivamente, para los transceptores de banda estrecha OFDM PLC a través líneas de corriente alterna y continua, utilizando frecuencias por debajo de 500 kHz. Estos estándares ITU-T soportan comunicaciones en redes HAN, Urbanas y Rurales, es decir sobre los tendidos de baja y media tensión (incluso atravesando los transformadores que existen entre ambas líneas).

4.3.7. Vehículo Eléctrico.

SAE J2293 es un estándar desarrollado por el *Hybrid Committee* el cual forma parte de SAE *international* y establece los requisitos básicos de interconexión de los vehículos eléctricos y los equipos de Suministro Eléctrico de los mismos. Básicamente normaliza la transferencia de energía eléctrica desde las distribuidoras de este recurso hacia los vehículos consumidores.

SAE J2836 se ocupa de compatibilizar las comunicaciones entre el plug-in de los vehículos eléctricos y la red eléctrica para la transferencia de energía y otras aplicaciones.

SAE J2847 es el protocolo de mensajes de comunicación entre vehículos eléctricos y otros componentes de la red.

4.3.8. Seguridad en las comunicaciones.

IEC 62351 regula los aspectos relativos a la seguridad de la información de la mayoría de los protocolos mencionados anteriormente. La seguridad es una preocupación importante de las redes inteligentes, que son especialmente vulnerables a los ataques de hackers como virus informáticos.

A continuación se presentan en la Tabla 4.2 los protocolos estudiados.

TABLA 4.2. Protocolos de comunicaciones para una Red Inteligente.

Estándar	Detalles	Aplicación
IEC 61970 & 61969	Provee Modelo de información común para el dominio de transmisión (61970) y distribución (61969)	Gestión de sistemas de energía
IEC 61850	Estándar abierto que regula las comunicaciones y automatización de subestaciones en los dominios de transmisión y distribución.	Automatización y control de subestaciones
IEC 62351	Define los aspectos relativos a la ciber-seguridad en las comunicaciones.	Seguridad en sistemas
IEEE P2030	Guía de interoperabilidad del sistema eléctrico de potencia.	Aplicaciones de Consumidores finales
IEEE P1901	Altas velocidades en PLC	Home Area Network
ITU-T G.9955 & G.9956	Contiene especificaciones técnicas de la capa física y de enlace respectivamente.	AMI, aplicaciones en el dominio de la distribución
OpenADR	Actualización dinámica de precios, Gestión de la Respuesta de la Demanda.	Control de carga y precios
BACnet	Sistema de comunicaciones escalable	Automatización de edificios
HomePlug Green PHY	Tecnología PLC para la interconexión de dispositivos dentro de los hogares	HAN
U-SNAP	Colección de protocolos para la interconexión de dispositivos de una HAN con los medidores inteligentes	HAN
ISA 100.11a	Estándar abierto para sistemas inalámbricos de sensores.	Automatización Industrial
ANSI C12.18	Transporte de datos de la red eléctrica utilizando una interfaz óptica.	AMI
ANSI C12.19	Modelo flexible de comunicaciones orientado al smart metering.	AMI
ANSI C12.22	Protocolo de soporte para la transmisión de los mensajes ANSI C12.19.	AMI
Z-Wave	Solución alternativa a Zigbee. Opera en la banda de los 800 MHz.	HAN
M-Bus	Estándar europeo para lectura remota de medidores inteligentes.	AMI
PRIME	Estándar de telemedición y control inter-operable por múltiples proveedores.	AMI
G3-PLC	Estándar de telemedición y control inter-operable.	AMI
SAE J2847	Protocolo de soporte de mensajes entre Vehículos eléctricos y otros componentes de la red.	Vehículos Eléctricos
SAE J2293	Establece los requisitos básicos de interconexión de los vehículos eléctricos y los equipos de suministros eléctricos.	Vehículos Eléctricos
SAE J2836	Regula las comunicaciones entre el plug-in de los vehículos eléctricos y la red eléctrica para la transferencia de energía.	Vehículos Eléctricos

4.4. Conclusiones.

La red inteligente se ha concebido como una evolución de los sistemas de energía eléctrica, principalmente con el fin de incorporar a la matriz energética la generación distribuida con fuentes renovables. Sin embargo el objetivo primordial es mejorar la eficiencia, fiabilidad y seguridad de la red existente. Con este fin, la recopilación de información a distancia referida a fallas en los equipos, limitaciones de capacidad, y accidentes naturales es extremadamente

crítica para asegurar el diagnóstico proactivo y en tiempo real de los posibles fallos en una SG.

En este capítulo se discutieron las diversas tecnologías de comunicaciones disponibles en la actualidad, capaces de dar soporte a una red inteligente. Las mismas fueron presentadas con sus ventajas y desventajas. Se realizó un especial énfasis en las tecnologías inalámbricas de cuarta generación dado el amplio sustento que las mismas ofrecen para múltiples aplicaciones y su bajo costo de implementación. En un segundo momento, se presentaron los protocolos que regulan las principales aplicaciones en una SG. Los mismos fueron categorizados según el tipo de servicio a prestar.

En los capítulos posteriores se retomarán estos conceptos para el diseño de un sistema de comuniones para una infraestructura de medición avanzada.

CAPÍTULO V

WIMAX COMO SOPORTE DE COMUNICACIONES PARA UNA SMART GRID. WiGRID.

5.1. Introducción.

En los capítulos III y IV se presentaron diversas tecnologías de comunicaciones capaces de soportar los requisitos de una SG. Se pudo apreciar como las tecnologías inalámbricas constituyen una opción factible para dar soporte de comunicaciones en una “Red Inteligente”, particularmente en el dominio de la Distribución. La principal ventaja de estas soluciones son el rápido despliegue y bajo costo de implementación que poseen.

En la búsqueda de tecnologías inalámbricas que proporcionen velocidades de transmisión altas y además sean robustas frente a canales de comunicación hostiles (como lo son los ambientes urbanos en donde no predomina una línea de vista entre transmisores y receptores), la solución parece llegar desde las recientes tecnologías móviles de cuarta generación (4G). Este trabajo se focaliza en el estudio de la única solución, hasta hoy, normalizada por la IEEE para estos despliegues, la familia de estándares “802.16”, comercialmente conocida como WiMAX [42].

WiMAX fue concebido para el desarrollo de redes MAN y redes WAN. La primera versión del estándar se publicó en el año 2002. Luego de varios procesos de revisiones, a finales del año 2005, se publicó una expansión de este estándar que facilitó la inclusión de comunicaciones móviles en la red. Actualmente esta tecnología cuenta con cuatro nuevas versiones que han sustituido a las anteriores. Durante este estudio se hablará en general del estándar IEEE 802.16 sin detallar la revisión. Sin embargo en caso de tratar algún aspecto puntual y no genérico para todas las versiones, se detallará con precisión la versión mencionada.

Es importante destacar que dicho estándar especifica las primeras dos capas del modelo OSI, la capa física (PHY, *Physical*) y la capa de enlace o acceso al medio (MAC, *Media Access Control*), permitiendo independencia de las capas superiores. Esta es una de las claves que permite a WiMAX adaptarse a redes con protocolos IP, así como con redes basadas en UETS, sin realizar ninguna modificación en la interface.

IEEE 802.16 identifica a tres diferentes actores dentro de una red: Estación Base (BS, *Base Station*), Estación Subscriptora (SS, *Subscriber Station*) y Estación Móvil (MS, *Movil Station*). La comunicación entre las estaciones subscriptoras y la estación base es bidireccional, pudiendo utilizar una duplexación para los canales de subida (*uplink*) y bajada (*downlnk*) en frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) o en tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*).

Una de las principales características que incorpora WiMAX es la utilización de modulaciones dinámicas, conocidas como “modulaciones adaptativas”. Esto significa que las estaciones pueden cambiar sus esquemas de modulación/codificación según el estado estimado del canal en un momento dado. Sin embargo los umbrales prefijados de SNR deberían ajustarse de forma *ad-hoc* al entorno utilizado. En el próximo capítulo se tendrá en cuenta este aspecto en la plataforma de simulación desarrollada, obteniendo umbrales adecuados para el escenario propuesto.

Otro aspecto saliente de esta tecnología radica en las múltiples técnicas de acceso que permiten compartir el medio inalámbrico entre múltiples usuarios. Entre estas técnicas de acceso mencionaremos los esquemas OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y TDMA (*Time Division Multiple Access*).

Al finalizar el capítulo se presentará una serie de recomendaciones formuladas por el “WiMAX Forum”, útiles en el despliegue de redes de datos basadas en tecnologías 802.16 orientadas a una SG. Este tipo de redes se las denomina “WiGRID”.

En el contexto de la tesis, este capítulo busca presentar las características técnicas de la tecnología utilizada, así como definir escenarios de trabajo, que se utilizarán en la plataforma de simulación.

5.2. Tecnologías Inalámbricas de 4ta Generación.

La cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil, o 4G, está orientada a una convergencia IP brindando altas tasas de transferencia y bajas latencias garantizando siempre calidad en el servicio prestado. Esta convergencia de tecnologías surge de la necesidad de agrupar los diferentes estándares en uso con el fin de delimitar el ámbito de funcionamiento de cada uno de ellos e integrar todas las posibilidades de comunicación en un único dispositivo de forma transparente al usuario.

El soporte para aplicaciones de *streaming*, como lo es TV-IP, se suma a la demanda ya existente de internet con contenido dinámico y tráfico de voz. Todo esto conlleva a la necesidad de protocolos robustos con altas tasas de transmisión capaces de inter-operar e integrar diferentes redes y sistemas (2G, 3G, etc). Es por esto que la 4G no se define como una única tecnología o estándar, sino como una colección de tecnologías y protocolos que buscan lograr el mejor rendimiento en una red inalámbrica.

Existen distintos tipos de implementaciones de tecnologías 4G, pero podemos reducir estos proyectos en tres grandes grupos: WiMAX, WiBro y 3GPP LTE (*Long Term Evolution*).

Los componentes fundamentales de una red 4G son:

- Sistemas Multi-antena (MIMO).
- SDR (*Software Define Radio*).

- Sistemas de acceso como TDMA, FDMA, CDMA y sus posibles combinaciones. Sin embargo la principal diferencia está en la capacidad de gestionar sistemas OFDMA, MC-CDMA y *Single Carrier* FDMA.
- Soporte de IPv6 lo que permitirá brindar servicios a un gran número de dispositivos inalámbricos, asegurando una mejor calidad de servicio, además de un enrutamiento óptimo.

En la tabla 5.1 se presenta una comparativa entre las principales soluciones 4G que actualmente pueden emplearse para una SG.

TABLA 5.1 – Tecnologías 4G disponibles en el mercado.

Denominación	Familia	Usos frecuentes	Tecnologías	Downstream	Upstream	Comentarios
				(Mbit/s)	(Mbit/s)	
HSPA+	3GPP	Usada en tecnologías de 4G Móviles.	CDMA/FDD MIMO	21	5.8	Dentro de las tecnologías inalámbricas de 4G, es la más prometedora alcanzando velocidades de hasta 672Mbps (según el Release 11 de dicho estándar). Sin embargo su masificación aún no se ha logrado.
				42	11.5	
				84	22	
				672	168	
LTE	3GPP	Tecnología de 4G.	OFDMA/MIMO/SC-FDMA	100 Cat3	50 Cat3/4	Es una implementación de 4G que ya comienza a cobrar gran importancia en los mercados referidos a las telecomunicaciones.
				150 Cat4 300 Cat5 (para 20 MHzBW/FDD)	75 Cat5 (para 20 MHzBW/ FDD)	
WiMax rel 1	802.16	WirelessMAN	MIMO-SOFDMA	37 (10 MHz TDD)	17 (10 MHz TDD)	Estos anchos de banda se alcanzan utilizando esquemas MIMO 2x2. Sin embargo esta implementación no es frecuentemente utilizada.
WiMax rel 1.5	802.16-2009	WirelessMAN y 4G	MIMO-SOFDMA	83 (20 MHz TDD)	46 (20 MHz TDD)	La primera implementación inalámbrica estandarizada por la IEEE capaz de alcanzar tasas y garantizar calidad de servicio soportando aplicaciones de 4G.
				141 (2x2 20 MHz FDD)	138 (2x2 20 MHz FDD)	
WiMAX rel 2	802.16m	WirelessMAN y 4G	MIMO-SOFDMA	<u>2x2 MIMO</u>	<u>2x2 MIMO</u>	Este esquema permite además asignar múltiples canales a determinados usuarios (con baja movilidad) para así llegar a obtener velocidades de hasta 1Gbps
				110 (20 MHz TDD)	70 (20 MHz TDD)	
				183 (2x20 MHz FDD)	188 (2x20 MHz FDD)	
				<u>4x4 MIMO</u>	<u>4x4 MIMO</u>	
				219 (20 MHz TDD)	140 (20 MHz TDD)	
365 (2x20 MHz FDD)	376 (2x20 MHz FDD)					

Básicamente se resaltan dos tecnologías inalámbricas (LTE y WiMAX) que ofrecen grandes velocidades, pudiendo llegar a cuadruplicar la velocidad a la que actualmente se accede a un sistema [43]. Las dos tecnologías son de alguna manera similares en la forma en que transmiten las señales e incluso en las velocidades de red que proporcionan. De hecho, las principales diferencias entre ambas son de índole política y residen en las compañías que las apoyan y sus respectivos intereses.

Aunque la mayoría de los analistas coincide en la opinión de que LTE dominará sin lugar a dudas sobre WiMAX en los próximos años, no se puede negar el hecho de que varias compañías ya han realizado importantes inversiones en esta última tecnología, además de que el estándar de WiMAX ya ha sido aprobado definitivamente por la IEEE, mientras que la especificación final de LTE aún no está disponible. A continuación se nombran dos diferencias importantes que fueron consideradas para la elección de la tecnología WiMAX:

1. Si bien ambas tecnologías emplean esquemas OFDMA en la etapa del *downlink*, WiMAX optimiza los mismos para obtener el máximo uso de canales aumentando el

procesamiento pagando un alto precio debido a que se utilizan FFT superiores a 1000 puntos.

2. Mientras que WiMAX también utiliza esquemas OFDMA para el enlace de subida, LTE opta por reducir la eficiencia empleando esquemas de una sola portadora (SC-FDMA, *Single Carrier FDMA*). OFDMA permite una gestión más eficiente del espectro así como brinda mayor robustez en canales con fading selectivo, sin embargo altos niveles de potencia pico promedio lo que conlleva a trabajar con bajos rendimientos en la etapa de amplificación de potencia.

Como se mencionó previamente, WiMAX es la única solución estandarizada en su versión final hasta el momento. Por otro lado este estándar busca en todo momento optimizar el uso de los canales y explotar la diversidad en frecuencia en los canales de subida y bajada. El costo que se asume para esto, es decir los altos niveles de procesamiento y elevado consumo energético son temáticas que avanzan en su resolución día a día en la comunidad científica mundial. Todo esto motiva a proponer a WiMAX como una solución sólida para despliegues inalámbricos de 4G capaces de cumplir con los requisitos exigentes de las aplicaciones de una SG.

5.3. Definición de un modelo de referencia para WiMAX.

Como previamente se mencionó WiMAX describe las capas PHY y MAC del modelo OSI. Definir un modelo adecuado de interconexión entre ambas capas, facilita la convergencia con las capas superiores (independizándose de las mismas) y optimiza la interoperabilidad entre diversos fabricantes, lo que reduce sustancialmente los costos de implementación. En la Figura 5.1 se esquematiza la arquitectura de dicho sistema.

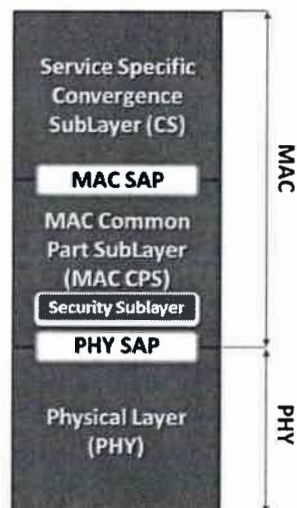


Figura 5.1. Modelo de referencia de WiMAX.

Si bien ambas capas serán descriptas en las próximas secciones con mayor detalle, no se debe perder de vista que el objetivo de este capítulo es justificar con fundamentos técnicos la elección del estándar 802.16 como soporte de comunicaciones para aplicaciones en una SG.

5.4. Capa Física (PHY).

La capa física (PHY) es la encargada de transformar los bits recibidos de capas superiores en señales eléctricas (o en el caso de los sistemas inalámbricos, electromagnéticas) para ser transmitidas al medio. Básicamente define las especificaciones de las etapas de codificación/decodificación y modulación/demodulación, además de la adaptación de antenas para los sistemas inalámbricos.

Basándose en el esquema de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), WiMAX define cuatro implementaciones diferentes para la capa PHY [44]:

- WirelessMAN-SC: Definida para trabajar en las bandas de 10-66 GHz, en ambientes LOS, utilizando modulación de una única portadora (SC, *Single Carrier*).
- WirelessMAN-OFDM: definida para operar con licencias por debajo de los 11GHz en entornos NLOS.
- WirelessMAN-OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*): similar a la *anterior*, salvo que utiliza esquema de múltiples usuarios.
- WirelessMAN-HUMAN (*High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network*): bandas no licenciadas ubicadas por debajo de los 11 GHz, utilizando OFDM u OFDMA.

El uso de estas depende tanto de las bandas de frecuencia a utilizar, como de los medios de acceso y requerimientos del enlace. Este trabajo se desarrolla empleando la interfaz *Wireless MAN-HUMAN* con esquemas de modulación OFDM-TDMA en bandas de frecuencia liberadas.

Como ya se mencionó, el principal elemento de esta capa radica en la utilización de esquemas de modulación basados en OFDM. Por esta razón se cree conveniente introducir al lector en ciertos conceptos básicos de diseño.

5.4.1. Conceptos básicos OFDM.

OFDM pertenece a la familia de los conocidos esquemas de modulación multi-portadoras, que se basan en dividir una alta tasa de datos, que se modularía en una sola portadora, en varias tasas, de menor velocidad, que se modularán en diferentes portadoras en paralelo. El espaciado entre estas portadoras es el mínimo necesario para garantizar ortogonalidad entre las mismas logrando mayor eficiencia espectral (permitiendo incluso el solapamiento de los espectros como se muestra en la Figura 5.2). En esta ilustración Δf representa el mínimo espaciado entre sub-portadoras, definido para sistemas de detección no coherentes como:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{simbolo}}} \quad \text{ec. 5.1}$$

Los esquemas basados en modulación multi-portadoras minimizan el efecto destructivo de la interferencia inter símbolo (ISI, *Inter Symbol Interference*) logrando que la duración del mismo sea mayor que el máximo ensanchamiento que puede producir el canal. Todo esto ocurre sin reducir la tasa de bits que se desea utilizar. El lector podrá profundizar estos conceptos remitiéndose al Anexo I.

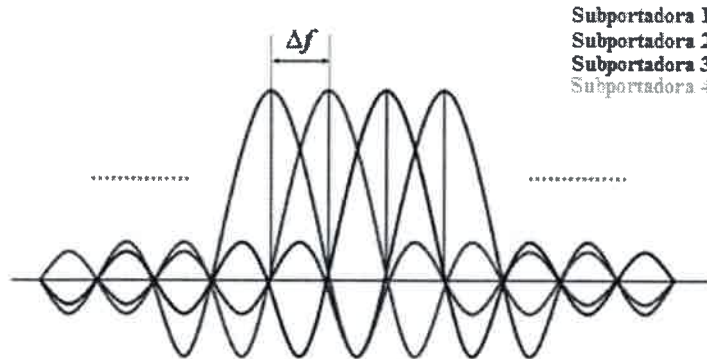


Figura 5.2. Esquema Multi-Portadora.

Este tipo de modulación fue presentada en los años 70, sin embargo, no fue hasta los años 90, gracias a la masificación de los DSP (*Digital Signal Processor*), que su implementación pudo realizarse a bajo costo. Esto se logró reemplazando los costosos bancos de osciladores perfectamente sincronizados por implementaciones digitales de las transformadas de Fourier. La Figura 5.3 ejemplifica un sistema OFDM.

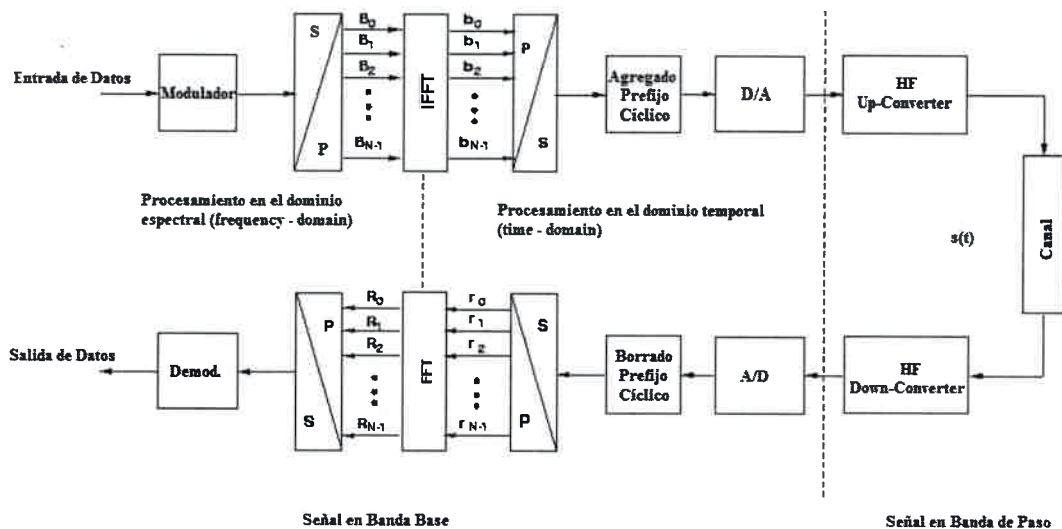


Figura 5.3. Sistema OFDM.

Como se puede observar en la Figura, se utiliza uno de los algoritmo más veloces para resolver Transformadas de Fourier, FFT/IFFT (*Fast Fourier Transform / Inverse Fast Fourier Transform*). Estos algoritmos son los encargados de crear los símbolos OFDM. El tamaño de la FFT es un parámetro crucial en el diseño de sistemas multi-portadora. Mientras mayor sea la cantidad de puntos de la FFT, el espaciado entre sub-portadoras se reducirá, lo que vuelve a cada símbolo vulnerable a problemas de ICI producto del Doppler o desincronizaciones en el sistema, siempre que se conserve el mismo ancho de banda en el cuál se colocan las mismas, lo que en la mayoría de los estándares suele ocurrir, ya que al aumentar el tamaño de la transformada también se aumenta la frecuencia de muestreo de manera que la longitud del símbolo sea constante. Se recomienda al lector recurrir a la sección de anexos para obtener información detallada acerca de todos los temas discutidos hasta ahora.

5.4.2. Parámetros OFDM en WiMAX.

Existen varias versiones del estándar WiMAX, pero pueden concentrarse en dos grandes grupos: una para comunicaciones fijas y otra para comunicaciones móviles. La principal diferencia entre ambos estándares radica en la sub-canalización utilizando OFDMA, mientras que para implementaciones fijas solo se puede canalizar en el enlace de subida, en el esquema móvil se puede hacer tanto en el enlace de subida como de bajada. A continuación se presenta una tabla comparativa con todos los parámetros de diseño de la capa Física de un sistema WiMAX-OFDM para dos de las revisiones más utilizadas del estándar.

TABLA 5.2. Parámetros de la capa Física de WiMAX – OFDM.

Parámetros	WiMAX Fijo (802.16d)		WiMAX Movil (802.16e)		
	Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Tamaño de la FFT (cantidad de sub-portadoras)	256	128	512	1024	2048
Sub-portadoras útiles para información	192	72	360	720	1440
Sub-portadoras Pilotos	8	12	60	120	240
Sub-portadoras de Guarda (nulas)	56	44	92	184	368
Prefijo Cíclico (o Tiempo de Guarda)	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Sobre Muestreo (F_s/BW)	Depende del ancho de banda: 7/6 para sistemas 256 OFDM, 8/7 para anchos de bandas múltiples de 1,75MHz y 28/25 para anchos de banda múltiples de 1,25 MHz; 1,5 MHz; 2 MHz o 2,75 MHz				
Ancho de banda del canal (MHz)	3,5	1,25	5	10	20
Espaciamiento entre sub-portadoras (KHz)	15,625		10,94		
Modulación	BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM				
Multiplexación	TDM, TDMA u OFDMA				
Duplexación	TDD o FDD				

A modo de explicación de la tabla presentada se analiza, como ejemplo, a WiMAX Fijo - Modo 1, extendiendo estos conceptos a los demás modos y estándares. Partiendo de una FFT de 256 puntos, se obtiene el equivalente a 256 sub portadoras espaciadas ortogonalmente que constituyen un símbolo OFDM. De estas 256, solo 192 transportarán datos útiles, 8 se utilizarán para sincronizar las tramas y estimar el canal de comunicaciones (portadoras pilotos), mientras que 56 no llevarán información y suelen ubicarse al principio y al final del símbolo para disminuir los efectos propios del enmascaramiento de la función *sinc* en la transmisión. La tasa de sobre muestreo y el ancho de banda del canal son parámetros de diseño que pueden modificarse en los equipos en busca de una mejor performance. En la tabla se dejaron fijos los valores de ancho de banda para poder calcular el espaciamiento entre sub-portadoras. Finalmente todos los estándares admiten los mismos métodos de modulación y multiplexado de las tramas, así también como para el duplexado que separa los enlaces de subida y bajada de datos.

5.4.3. Sub-canalización: OFDMA.

El objetivo primordial de la sub-canalización es proveer acceso a múltiples usuarios. Las sub-portadoras disponibles para el transporte de datos pueden ser divididas en subgrupos a los que se denominan sub-canales. La utilización de sub-canales permite a los usuarios utilizar solo una parte del espectro para enviar datos y de esta forma mejorar sustancialmente el consumo de batería de los equipos (ya que ahora solo transmite en una banda de frecuencias más pequeña). Esto se hace a costa de perder capacidad en la transmisión, sin embargo para el perfil de tráfico de una *Smart Grid* (mencionado en el capítulo anterior, sección 4.6.4) esto no significa un problema.

Los sub-canales pueden constituirse usando sub-portadoras contiguas, intercaladas o generalizada. Mientras que las técnicas de ubicación contiguas disminuyen los efectos negativos que pueden surgir por problemas de sincronismo (ICI en particular), las mismas no explotan la diversidad en frecuencia que poseen naturalmente los símbolos OFDM, como si lo hacen las técnicas de ubicación intercaladas y generalizadas. Particularmente, esta última consiste en repartir canales de un grupo, ubicando espectralmente a los usuarios en las posiciones donde la condición del canal sea la más favorable. Así se logran obtener importantes beneficios en aplicaciones en donde el desvanecimiento del canal es muy selectivo en frecuencia.

5.4.4. Slots y Estructura de una Trama WiMAX.

La capa física también es la responsable de la ubicación y asignación de los *Slots* (ranura de tiempo/frecuencia mínima que contiene información) dentro de las tramas (*frames*) encargadas de organizar los *slots*. Cada *slot* posee un grupo de sub-portadoras (un sub-canal) que puede ubicarse en 1, 2 o 3 símbolos OFDM, dependiendo del esquema de sub-canalización que se use. A su vez un conjunto de slots contiguos se denomina como región

de datos (DR, *Data Region*), estos DR se pueden asignar a diferentes usuarios basándose en la demanda, reglas de QoS o condiciones del canal.

La Figura 5.4 ilustra una trama OFDM operando con una duplexación TDD. El *frame* (que puede durar entre 2ms a 20ms) se divide en 2 sub-frames: un *Down-link frame* (enlace descendente) seguido de un *Up-Link frame* (enlace de subida) más un intervalo de guarda. La relación entre estos *sub-frames* viene dada por D:U, en donde “D” representa al porcentaje de trama destinado para la bajada de información y “U” para el enlace de subida. Algunos valores típicos van desde 3:1 hasta 1:1. Si bien el esquema presentado para separar las sub-tramas es TDD, WiMAX soporta esquemas FDD, sin embargo, un esquema TDD utiliza solo un canal lo que brinda una mayor eficiencia en el uso del espectro, además de ser más flexible para compartir ancho de banda entre ambos enlaces, lo que facilita su rápida implementación y ajuste en una infraestructura de medición para una SG.

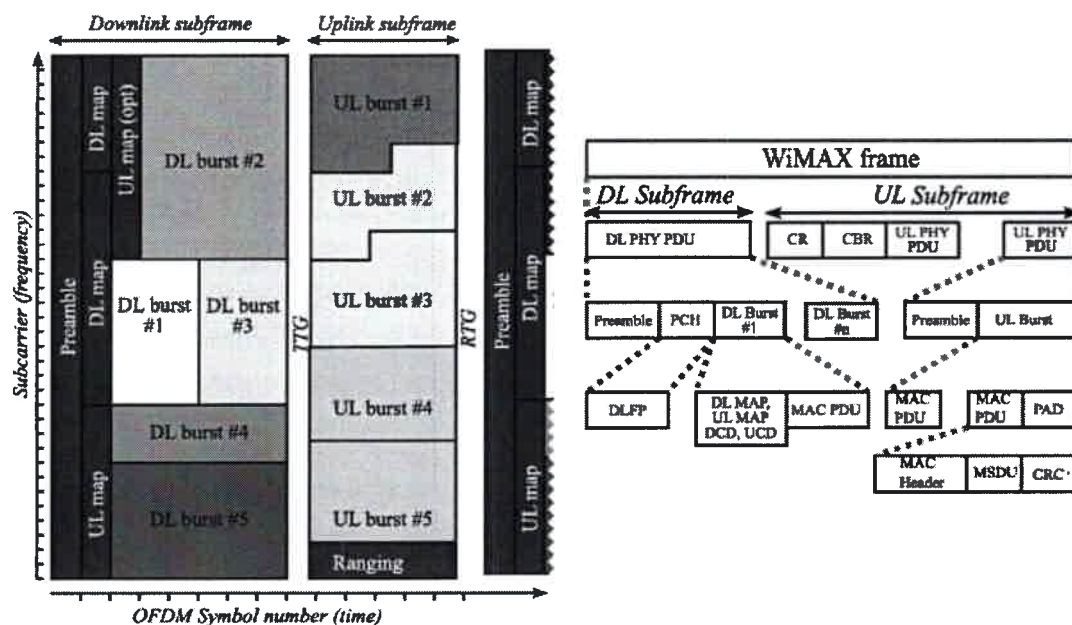


Figura 5.4. Estructura de una trama WiMAX-OFDMA [45].

Como se muestra en la Figura 5.4, el *Down-Link sub-frame* comienza con un preámbulo que es usado por la capa física para realizar la sincronización en frecuencia, como la primera estimación del canal. Luego del preámbulo se encuentran las cabeceras de control de trama (FCH, *Frame Control Header*), las cuales proveen información de configuración como los mensajes MAP (DL-MAP para el *downlink* y UL-MAP para el *uplink*) que indican las modulaciones/codificaciones utilizadas, portadoras útiles, perfiles de usuarios, etc. Dado que la información contenida por el preámbulo y los mensajes MAP es crítica para el correcto funcionamiento del sistema, siempre se modularán utilizando esquemas robustos (particularmente BPSK con una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ en WiMAX), logrando que todos los usuarios en el radio de cobertura accedan a esta información. Luego de estos parámetros

se encuentran las ráfagas de datos (*DL Burst*) que contienen la información solicitada a descargar por los usuarios.

En cuanto al Up-Link se compone solo de dos partes. La primera es el *Ranging*, un *sub-frame* usado para ajustar de forma periódica sincronizaciones en frecuencia, tiempo y potencia de transmisión. Otro indicador que se transmite en *ranging* es el estimador de la calidad del canal (CQICH, *Channel Quality Indicator Channel*) que es una respuesta a la estimación de canal previamente realizada con los pilotos enviados por la estación Base al subscriptor en el preámbulo explicado en el párrafo anterior. En segundo lugar se pueden apreciar las ráfagas de datos (*UL Burst*) que contienen las solicitudes o respuestas a pedidos por parte de los usuarios.

Un problema que se analizará en el próximo capítulo consiste en el estudio de la sobre carga que representan las cabeceras de información necesarias para el funcionamiento del sistema, reduciendo así la eficiencia en cuanto a capacidad de transmisión y latencia.

5.4.5. Adaptive Modulation and Coding (AMC).

WiMAX soporta una gran variedad de esquemas de modulación y codificación con los que se puede trabajar en cada ráfaga de información a transmitir dependiendo las condiciones del canal. Utilizando el indicador CQICH, la SS notifica a la BS la estimación del canal en el enlace descendente (*downlink*), mientras que para el *uplink* la BS podrá estimar la calidad del canal basándose en la calidad de la señal recibida. Con toda esta información la BS puede programar la asignación de modulaciones y codificaciones para cada usuario en función de las condiciones del canal, maximizando el *throughput* en función de la SNR recibida.

Tanto WiMAX como LTE definen un grupo determinado de indicadores CQI que se corresponden con una combinación de modulación/codificación seleccionada para un determinado valor SNR. Este punto de diseño se retomará nuevamente en el próximo capítulo.

5.5. Capa de Acceso al Medio (MAC).

La función principal de la capa MAC es la de proveer una interface entre las capas de transporte superiores y la capa física. Esta capa se encarga de tomar paquetes de información de capas superiores (MSDUs, *MAC Service Data Units*) y los organiza de forma protocolar para su transmisión a la capa física (MPDUs, *MAC Protocol Data Units*). Un aspecto muy estudiado en [46] y [47] se centra en las subcapas de convergencia que utiliza MAC en WiMAX para independizar los protocolos superiores (ATM, TDM Voice, Ethernet, IP entre otros) en la transmisión de la información al medio. Sin embargo, dada la predominancia de los protocolos Ethernet e IP, el WiMAX Forum ha escogido dar soporte solo para estos dos.

En la Figura 5.5, se muestran varios ejemplos de paquetes MAC entramados (MAC PDU, *MAC Packet Data Unit*). Cada uno de estos está encabezado por un campo genérico

denominado “Cabecera Generica MAC” (GMH, *Generic MAC Header*), la cual se compone principalmente de los identificadores de conexión (CID, *Connection Identifier*). En “a” puede observarse varios paquetes MSDU de longitud fija en la MAC PDU, mientras que “b” muestra el transporte de solo un paquete. Puede apreciarse en “c” varios paquetes de longitud variable, por lo que deben ir precedidos por sub-cabeceras que informen la longitud de los mismos.

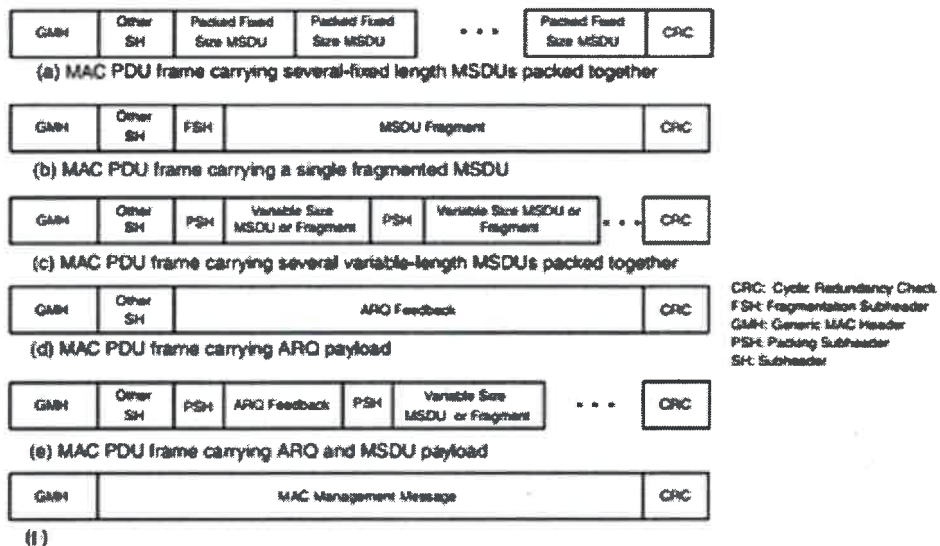


Figura 5.5. Trama de gestión de la capa MAC [48].

WiMAX soporta esquemas ARQ, que se utilizan para requerir la retransmisión de un MSDU. El paquete ARQ puede estar fragmentado, como se ilustra en “d” o completo como está representado en “e”. Finalmente en la Figura 5.5.f se muestran mensajes de gestión de la capa utilizados por el protocolo para su ajuste y sincronización. Cabe aclarar que en todos los casos se realiza un chequeo de control cíclico para garantizar la fiabilidad de la comunicación.

5.5.1. Mecanismos de Acceso.

En WiMAX la capa MAC es la responsable de reservar y asignar el ancho de banda a cada uno de los usuarios del sistema, tanto para el enlace ascendente como el descendente. En ambos casos, la BS asignará un determinado ancho de banda a cada SS (o MS), basándose en el tipo de tráfico solicitado y los permisos que el usuario demandante tenga.

El protocolo soporta diversos mecanismos de asignación de capacidad. La BS asigna recursos “dedicados” o “compartidos” de forma periódica a cada estación SS para que las mismas soliciten un ancho de banda. Este proceso, conocido como “polling” se puede realizar de manera individual (*unicast*) o grupal (*multicast*). En sistemas *multicast* el espacio, ya sea temporal o en el dominio de la frecuencia, reservado para que las estaciones suscriptoras

requieran “asignación de recursos” es compartido, por lo que WiMAX define un esquema de contención y resolución para gestionar a los múltiples usuarios que desean acceder a este medio compartido.

5.5.2. Calidad de Servicio (QoS).

El soporte de calidad de servicio (QoS) es una parte fundamental de la capa MAC de WiMAX. Antes de que cualquier comunicación se inicie, la estación base (BS) y la suscriptora (SS o MS) establecen un enlace lógico unidireccional entre ambas capas MAC. Cada conexión es identificada por una variable (CID, *Connection Identifier*) encargada de mantener, de forma temporal, el vínculo de esta comunicación en particular.

Además del mencionado CID, WiMAX define el concepto de Servicio de Flujo (SFID, *Service Flow Identifier*), cuya función principal es identificar prioridad en el tráfico cursado, maximizar la tasa de bits por ráfaga y esquemas de retrasmisión (tipo de ARQ), minimizar retardo y tolerancia de *jitter*, gestionar los pedidos y asignación de mayores anchos de banda de transmisión, etc. Todas estas funciones mencionadas logran que WiMAX pueda soportar una gran variedad de aplicaciones. Esto conlleva en la definición de 5 diferentes clases de servicio que se presentan a continuación.

- *Unsolicited Grant Service* (UGS) – Servicio garantizado sin solicitud. Empleado en servicios de tiempo real, que generan paquetes de tamaño fijo de forma periódica, La estación base coloca intervalos periódicos para cada flujo, sin la necesidad de negociar un ancho de banda. Ideal para aplicaciones de telemetría con exigencias predefinidas o sistemas de VoIP.
- *Real-Time Polling Service* (rtPS) – Servicio en tiempo real por votación. Utilizado en servicios de tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de forma periódica. La estación base asigna tiempo en el canal de subida periódicamente para que los terminales con este tipo de tráfico puedan hacer solicitudes de ancho de banda. En dichas solicitudes, se indica el volumen de datos que se desea transmitir. Servicio adaptivo empleado *streaming* de audio y video (cámaras de vigilancia, sistemas de video monitoreo, etc).
- *Extended Real-Time Polling Service* (ertPS) – Servicio en tiempo real por votación extendido, válido en las versiones del estándar IEEE 802.16e o superiores. Es un sistema híbrido entre UGS y rtPS. La estación base coloca periódicamente parte del canal para que los terminales transmitan. Los terminales comunican cambios de tamaño a través del ancho de banda asignado. Utilizado en aplicaciones VoIP con supresión de ecos.
- *Non-Real-Time Polling Service* (nrtPS) – Servicio de votación para aplicaciones en tiempo no real. Para servicios que no sean en tiempo real, que generan tamaños de paquete variables con una cantidad mínima de datos para transmitir. La estación base pregunta a los terminales regularmente, aunque no periódicamente. Cada petición

especifica el volumen de datos con un límite máximo del tiempo entre peticiones. Utilizado para el intercambio de archivos por protocolos como FTP y redes P2P.

- *Best Effort Service* (BE). Los terminales envían peticiones y esperan a que la estación base les permita transmitir. Solo se dispone de recursos sobrantes. Protocolos como HTTP suelen utilizar este servicio.

5.5.3. Funciones de Seguridad.

A diferencia de los estándares Wi-Fi, WiMAX fue diseñado teniendo en cuenta importantes puntos referidos a la seguridad del sistema. El estándar, con sus modificaciones más recientes, incluye novedosos métodos para asegurar la privacidad de la información de los usuarios y previniendo los accesos no autorizados, siempre garantizando los principios de movilidad, cobertura y calidad de servicio en las comunicaciones [49] [50]. A continuación se mencionan los aspectos claves, tenidos en lo concerniente a la seguridad en un sistema WiMAX:

- Privacidad. Se utilizan sistemas criptográficos robustos para garantizar la confidencialidad de la información transmitida. Alguno de los esquemas de encriptación utilizados son AES (*Advanced Encryption Standard*) y 3DES (*Triple Data Encryption Standard*), ambos con pueden utilizar llaves de 128 – 256 bits.
- Autenticación de usuarios/dispositivos. WiMAX posee un sistema flexible de autenticación basado en el “*framework*” de la IETF (*Internet Engineering Task Force*) denominado EAP, el cual soporta una gran variedad de credenciales tales como “*users/passwords*”, “*certificados digitales*” y “*Smart cards*”.
- Protocolo de manejo de llaves. El protocolo utilizado para el intercambio seguro de llaves está basado en PKMv2 (*Privacy and Key Management Protocol Version 2*).
- Mensajes de control. La integridad del control de mensajes en la transmisión inalámbrica se realiza usando esquemas del tipo “*digest*”, tales como AES basado en CMAC o MD5 basado en HMAC.
- Soporte para *handover* rápido. Se denomina *handover* al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones.

5.5.4. Funciones avanzadas.

A diferencia de la mayoría de los estándares inalámbricos que actualmente se comercializan, WiMAX presenta funciones adicionales que optimizan el rendimiento del sistema, desde varios aspectos,

HARQ. Es uno de los esquemas ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) utilizados para asegurar la transferencia de datos confiables. Los ARQ-Híbridos, además de revisar la integridad de los paquetes recibidos, como lo hacen los esquemas ARQ tradicionales, entregan información que permite corregir algunos errores (utilizando sistemas FEC), sin la necesidad de solicitar data extra. Esto resulta en la no necesidad de un canal de vuelta hacia el transmisor o de evitar retransmisiones, pero teniendo como costo un mayor ancho de banda. Por esta razón son más utilizados donde realizar una retransmisión es muy costoso o difícil técnicamente [51].

MIMO. Es el acrónimo de *Multiple Input, Multiple Output* que permiten realizar una multiplexación espacial de señales mejorando sustancialmente la cobertura y/o el *throughput* de la comunicación. Por multiplexación espacial se entiende la emisión a través de múltiples antenas de flujos diferentes de señales codificadas individualmente (se sugiere recurrir a codificación de Alamouti [52]) en paralelo; consiguiendo transportar más datos en un canal determinado (los datos pueden ser de información o redundancia, marcando la diferencia entre mayor *throughput* o mayor cobertura). En el extremo receptor, cada antena decodifica cada corriente de señales haciendo la operación inversa a la que se efectúa en la transmisión (demultiplexación).

5.6. WiGRID.

En una SG, tanto la generación, distribución y consumo de energía se gestionan a través de una misma red de datos. Para ello, las diferentes aplicaciones (AMI, DA y RTP) deben coexistir, con diferentes niveles de prioridad dentro de dicha red. Por ejemplo, los datos de medición pueden recibir menor prioridad que las notificaciones de fallas. La capacidad de controlar y gestionar activamente el tráfico permite a las empresas de suministros energéticos hacer frente a una mezcla compleja de requisitos impulsados por múltiples aplicaciones que buscan optimizar las operaciones del sistema.

La Figura 5.6, ilustra esquemáticamente una arquitectura que abarca diferentes dominios de una red eléctrica (generación, distribución y consumo) utilizando a WiMAX como tecnología de comunicaciones. Esta solución fue denominada por el WiMAX Forum como WiGRID.

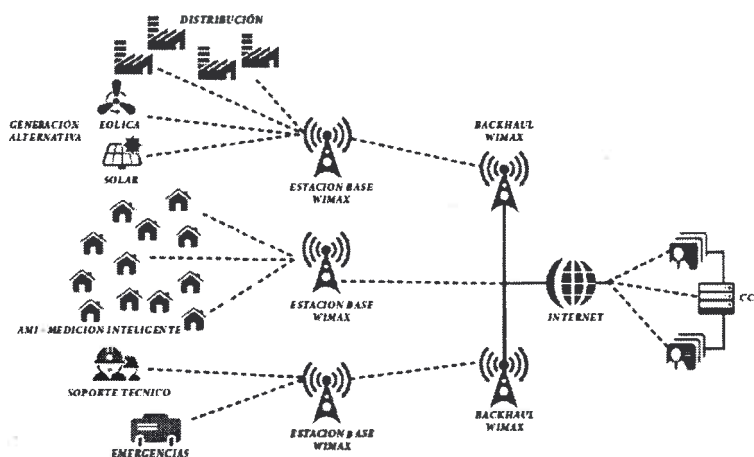


Figura 5.6. Arquitectura general de comunicación utilizando WiMAX.

Los elementos más importantes, que se observan en dicha figura, pueden clasificarse en 3 grupos:

1. Medidores inteligentes (SM, *Smart Meters*), o también llamadas estaciones subscriptoras, y dispositivos inteligentes que se encuentran distribuidos en los puntos de consumo como también en aquellas ubicaciones en donde se desee controlar alguna variable.
2. Estación Base y concentradores que se encargan de dar cobertura, calidad de servicio, prioridades a los distintos dispositivos inteligentes y medidores inteligentes, y proveer información desde y hacia el Centro de Control de Red (CCR).
3. El CCR es el encargado de nuclear y gestionar toda la información de la red.

El WiMAX Forum recientemente ha confeccionado un documento titulado “*System Profile Requirements for Smart Grid Applications*”, también conocido como “Requerimientos para una WiGRID” [53]. Este instrumento intenta definir y justificar la utilización de estándares 802.16, en sus versiones “e”, “m”, “n” y “p”, como tecnologías de comunicaciones capaces de soportar los requisitos de una SG. Se proponen 2 escenarios de implementación:

- WiGRID-1 basado en 802.16e [42] (con la opción de utilizar 802.16m [54]).
- WiGRID-2 basado en 802.16n [55] y 802.16p [56].

Dado que las enmiendas de la WiGRID-2 no han sido terminadas y ratificadas aún por los organismos de regulación, las especificaciones que se presentaran en este trabajo serán solo preliminares.

5.6.1. WiGRID-1.

A continuación se definirán los requerimientos que deberá satisfacer una WiGRID-1.

Latencia. Dado que el escenario principal de aplicación se lo puede considerar estacionario, es decir que los *Smart Meters* poseen nula velocidad relativa frente a los concentradores en la mayoría de los casos, el WiMAX Forum propone en el documento previamente mencionado la siguiente clasificación de latencias en función de la disponibilidad de los enlaces:

TABLA 5.3. Latencias para una WiGRID-1.

Disponibilidad del enlace	Latencia
99.5%	100 ms
99.7%	200 ms
99.8%	400 ms

Estos requerimientos se establecen para no más de 2 saltos de ruteo en condiciones de trabajo normales. Las latencias presentadas no incluyen ningún tiempo adicional, como lo establece el estándar 802.16p para el caso de recuperación de redes degradadas [56].

Cantidad de Terminales Activos. La cantidad de usuarios simultáneos por sector, en una infraestructura WiGRID – AMI puede largamente exceder los 1800 terminales en una zona densamente urbanizada. Asumiendo 3 sectores de 120°, se requerirá que el nodo concentrador (también mencionado como *Base Station*, BS) soporte 5400 medidores inteligentes. Los requisitos que la WiGRID-1 demanda bajo estas condiciones son los siguientes:

- Paquete promedio a transmitir: 350 Bytes
- Latencia < 1 seg.
- Disponibilidad del 99.5%

Rango extendido de cobertura. Para un enlace punto a punto (utilizados como *Backhaul* de comunicaciones), el rango de cobertura se debe encontrar entre 37 – 52.5 km.

Relación Up-Link (UL) / Down-Link (DL) de los Smart Meters. En una SG el tráfico predominante es en el sentido del Smart Meter hacia la BS (tráfico UL). Si se utiliza un esquema TDD, el estándar prevé relaciones UL/DL que van desde 1:1.75 a 1.75:1. Como se ha mencionado con anterioridad deberá priorizarse el enlace UL por lo que se aconseja para aplicaciones AMI utilizar relaciones UL/DL = 1.75:1.

QoS. Se recomienda utilizar un perfil UGS con mejoramiento de latencia.

Recomendaciones referentes a seguridad y aplicaciones móviles quedan definidas directamente de los estándares 802.16e y 802.16m, sin ninguna aclaración extra.

5.6.2. WiGRID-2.

A diferencia de las versiones anteriores, la revisión IEEE 802.16n ha sido diseñada para desarrollar sistemas de alta disponibilidad y robustez consistentes con los requisitos de comunicaciones de una SG. Por otro lado la revisión IEEE 802.16p se ha focalizado en optimizar las interfaces Máquina-Máquina (M2M, *Machine to Machine*), logrando reducir el consumo de energía de los dispositivos, reduciendo el “*overhead*” frente a grandes cantidades de usuarios y aumentando las consideraciones referentes a la seguridad del sistema.

Este trabajo no se ocupará de detallar las consideraciones tomadas para definir una WiGRID-2 ya que hasta la fecha solo son preliminares, hasta que los estándares 802.16 “p” y “n” sean ratificados en su versión final por la IEEE.

5.6.3. Implementaciones Pilotos.

A continuación se presentan tres casos de implementación piloto realizados en tres países distintos: Japón, U.S.A. y Argentina. Estas implementaciones aún se encuentran en proceso de calibración pero ya han arrojado algunos resultados muy interesantes, que forman parte del objetivo central de esta tesis. Todos los casos exponen haber realizado los diseños en función del estándar IEEE 802.16n.

El primer caso de estudio fue desarrollado en la compañía *Kyushu Electric Power Company* [57] en Japón. Esta compañía posee un mercado de 7.6 millones de consumidores de un total de 76.3 millones. El proyecto comenzó a principios del año 2012 y ya se han instalado 100 medidores en un campo de pruebas. Se planea alcanzar entre 2013-2015 alrededor de 700.000 medidores, y de esta forma lograr un despliegue completo en poco menos de 10 años. Los medidores son desarrollados por la empresa KDDI, mientras que la red de comunicaciones pertenece a la empresa distribuidora del suministro eléctrico.

El segundo estudio ocurre en la ciudad de Houston, Texas, Estados Unidos de América. El objetivo principal que desea lograr la compañía *Center Point Energy* [58] es el de diseñar y construir una red de comunicaciones basada en WiMAX para el soporte de una infraestructura de medición avanzada. El proyecto pronostica alcanzar, en un lapso de 42 meses, los siguientes puntos:

- Dar cobertura a más de 8000 km cuadrados, cumpliendo con los requisitos de una WiGRID 1.
- Implementar aproximadamente 5.500 celdas (BS) WiMAX (encargadas de recolectar de datos) y construir 140 torres de comunicación para interconectar 2.300.000 medidores.

Finalmente, se presenta el caso local de la empresa Alvarion [59] en conjunto con la gobernación de la ciudad de Mar del Plata, Argentina, han comenzado un proyecto para convertir a dicha ciudad en una *Smart City*, pionera en Latinoamérica [60]. El desafío

propuesto intenta interconectar 271 puntos de acceso, en escenarios urbanos y rurales, dando soporte de comunicaciones para diversas aplicaciones (datos, video y voz).

5.7. Conclusiones.

En el transcurso de este capítulo se presentó a WiMAX como una solución viable para brindar soporte de comunicaciones en una red inteligente. Tras comparar diversas tecnologías, se pudo apreciar que dos de ellas encabezan el mercado celular, LTE y WiMAX. Si bien LTE constituye una migración natural para la ya difundida GSM, WiMAX es el primer estándar que ha sido normalizado por un organismo internacional (IEEE 802.16), esto ha permitido avanzar en investigaciones referentes a una velocidad mayor que en LTE, por lo que se cuenta con un importante *background* de estudio, esta es la principal razón por la que se decidió utilizar a WiMAX como referencia de estudio.

Es en función de esta tecnología, se diseñará el modelo con el cual se realizarán las simulaciones de los próximos capítulos. La norma 802.16 puede definirse con sólo utilizar las dos primeras capas del modelo OSI (capa física-PHY- y capa de Acceso-MAC). La sección 5.5 se ocupó de especificar los principales mecanismos que permiten el funcionamiento del sistema. La modulación basada en OFDM, es el punto de mayor importancia en el diseño de sistemas inalámbricos robustos frente a canales con desvanecimiento por multi-camino, este punto se trató en la sección 5.5.2 y 5.5.3, mientras que los temas referidos a la distribución de la información y conformación de los símbolos en tramas temporales, fueron tratados en las secciones 5.5.4 y 5.5.5, respectivamente. La sección 5.6 se focalizó en presentar los mecanismos de acceso para esquemas de múltiples usuarios, las funciones de control de calidad e implementación de estándares de seguridad en la transmisión.

Finalmente, en la sección 5.6, se incorporó un nuevo concepto, WiGRID, que apunta identificar soluciones inalámbricas basadas en tecnologías WiMAX, orientadas a satisfacer las necesidades de una SG. En el apartado 5.6.3 se presentaron casos reales de implementación a baja escala en Japón, U.S.A. y Argentina. Cabe destacar que en estos casos de estudio no contemplan los requisitos de una WiGRID, es decir son despliegues aislados basados en WiMAX que buscan satisfacer los requisitos de comunicaciones de aplicaciones puntuales pero no de una infraestructura de medición avanzada. Esto es lo que motiva a este trabajo a construir una plataforma de simulación basada en WiMAX para evaluar la viabilidad de una WiGRID en un ambiente urbano.

CAPÍTULO VI

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PERFORMANCES DE UNA WiGRID. ESTUDIO PARA ZONAS RURALES.

6.1. Introducción.

Dada la naturaleza no lineal y compleja de la mayoría de los canales inalámbricos [48], resulta imposible determinar con exactitud los rendimientos de sistemas de esta índole basándose solamente en métodos analíticos. Sin embargo podemos servirnos de estas herramientas para acotar y encontrar fronteras para diferentes modelos de propagación. Por otro lado, los modelos computacionales pueden utilizarse para validar y optimizar los resultados analíticos.

Para el modelado completo de un sistema WiMAX, deben implementarse las dos primeras capas del modelo OSI (PHY y MAC) [61]. Los resultados obtenidos se utilizarán para evaluar el funcionamiento de aplicaciones de una SG, las cuales se analizan para capas superiores de este modelo. Dado que este estudio conlleva a un gasto numérico enorme, el cual puede ralentizar los procesos de simulación, se suele separar la simulación en dos niveles:

1. *Link-Level Simulation*. El cual se centra en el modelado completo del comportamiento de un enlace teniendo en cuenta principalmente todos los aspectos relacionados a la capa física (PHY) y algunos puntos cruciales de la capa de acceso (MAC). Al centrarse en enlaces Punto a Punto los resultados se expresan en función de la relación SNR.
2. *System-Level Simulation*. Se sirve de los modelos abstraídos que se obtuvieron en la etapa de *Link-Level Simulation* para crear una red con múltiples estaciones suscriptoras y estaciones bases interconectadas, estudiando performances para capas superiores a la MAC. En este caso se consideran los múltiples usuarios en un esquema con múltiples BS, por lo que los resultados deben estar expresados en función de la relación señal ruido-interferencia (SINR, *Signal Interference Noise Ratio*).

La Tabla 6.1 presenta las características más relevantes de las simulaciones a nivel de enlace y sistema.

TABLA 6.1. Comparación de simulaciones a nivel de enlace y sistema.

Función	Link Level Simulation	System Level Simulation
Objetivo	Estudiar diferentes esquemas de transmisión y recepción.	Estudiar rendimientos de aplicaciones y protocolos específicos.
Enlaces	Enlace punto a punto	Múltiples Enlaces
Celdas	1 Celda	Múltiples Celdas
Estación Base (BS)	1 BS	Múltiples BSs
Capas del Modelo	Énfasis en la capa Física y algunos aspectos de la capa MAC.	Se abstrae de la capa Física, para ocuparse del resto de las capas (MAC, IP, Transporte, ...)

El objetivo de este capítulo es focalizarse en el diseño de un modelo numérico para la primera etapa, es decir para el “*Link-Level Simulation*”, diseñando y evaluando una solución capaz de dar soporte de comunicaciones a una SG en una zona con baja densidad de habitantes, en dónde una sola BS puede brindar cobertura a todos los dispositivos (*smart meters*) presentes en la red. En este escenario, es trivial realizar un estudio a nivel de sistema, dado que su impacto que solo se analiza una celda aislada, por lo que se desprecia una evaluación para esta etapa.

El principal aporte de este capítulo radica en la nueva determinación los umbrales de SNR que se utilizarán en los esquemas de modulación adaptiva (AMC) para mejorar la capacidad de transmisión del sistema. Si bien el estándar ya los contempla, los mismos fueron definidos en función de un canal AWGN, sin tener en cuenta los problemas de fading a micro y macro escala producidos principalmente por los el multi-camino y las interferencias externas. Por este motivo se deberá recrear un escenario de simulación, basado en entornos urbanos, contemplando los modelos de canal y los parámetros de implementación definidos en WiMAX [56] para ejecuciones en área con baja densidad de habitantes. El modelo completo se desarrollará utilizando la plataforma MatLab ®.

La sección 6.3, realiza una investigación acerca de la determinación de umbrales de SNR, necesarios para la utilización de esquemas AMC, haciendo un fuerte hincapié en un modelo de canal hostil para la celda. Estos resultados son útiles para diagramar coberturas extensas en zonas aisladas, en donde solo es necesario una estación base, como ya se mencionó.

6.2. Metodología.

El modelo implementado consiste en la transmisión de símbolos OFDM, cumpliendo con todos los requisitos que el estándar 802.16 ofrece para las capas Físicas y de Acceso. La elección de la cantidad de símbolos a transmitir se realiza teniendo en cuenta el perfil de los datos presentado en el Capítulo III, sección 3.6.4. Determinados los símbolos, se procede a

realizar el cálculo numérico correspondiente, variando en primer lugar la relación SNR percibida por los receptores y luego los esquemas de codificación/modulación que la norma soporta. Luego se analizan los distintos rendimientos obtenidos en busca de los umbrales que existen entre cada esquema analizado. Esta información se utiliza para definir los indicadores de calidad del canal (CQICH). Para el modelo se asumirán 15 posibles CQICH [67] (ver ANEXO II). Sin embargo a fines prácticos, las secciones 6.3.2, 6.3.3 y 6.3.4 presentarán un estudio exhaustivo solo para seis esquemas, resaltando que el proceso es el mismo para las demás combinaciones. Mientras que la sección 6.4 reúne las consideraciones y resultados finales que se utilizarán en el próximo capítulo.

6.3. Estudio para despliegue en zonas de baja densidad poblacional.

Como se mencionó en la introducción, las simulaciones a nivel de enlace estudian el comportamiento de un enlace de comunicaciones frente a un canal de condiciones variantes. Los resultados pueden ser indicadores de los potenciales beneficios que se obtienen para una determinada capa física [63]. Los resultados son generalmente expresados en términos de la tasa de error de bits (BER, *Bit Error Rate*) o la tasa de error por bloque de bits transmitido (BLER, *Block Error Rate*).

Un aspecto crucial a la hora de diseñar una simulación a nivel de enlace para una WiGRID, consiste en la selección y modelado del canal de comunicaciones con fading por multicamino (predominante en ambientes urbanos). Para este capítulo se utilizaron los modelos propuestos por la *Stanford University Interim* (SUI), la cual propone seis diferentes tipos de canales inalámbricos, y son recomendados por el WiMAX Forum [64].

6.3.1. Modelo de enlace para una infraestructura de medición avanzada.

Aunque el estándar IEEE 802.16 proporciona la interfaz de aire para WiMAX, el mismo no define un sistema de extremo a extremo para su implementación. Por esta razón el modelo que se presenta en este documento se debió basar en las recomendaciones del *WiMAX Forum Working Group* (NWG) que se utiliza como marco de referencia para despliegues de WiMAX, garantizando la interoperabilidad entre dispositivos y operadores.

El modelo presentado en la Figura 6.1 consta de una celda dividida en 3 sectores de 120°, cubriendo una distancia máxima de 7 km (radio) y garantizando una disponibilidad del enlace del 99.9%. La BS gestionará hasta 100 conexiones simultáneas por canal. Para la infraestructura inalámbrica se adopta una topología de red tipo estrella en donde los SM se conectan a una BS que es la encargada de concentrar y cursar el tráfico de la zona. La BS utiliza una antena sectorial que se encuentra a una altura de 30m mientras que las antenas de los SM poseen una altura mínima de 6m. Las antenas de los SM son direccionales con un ancho de haz de 30°. Ambas antenas utilizan una polarización vertical [62].

Para definir la interfaz utilizada en la capa PHY, se escogió la interfaz "Wireless MAN-HUMAN" con OFDM, utilizando un esquema adaptativo de modulación y codificación. La duplexación para el enlace de subida y el de bajada se realiza por división de tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*). Finalmente el sistema utiliza como método de acceso un esquema de multiplexación por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*). La ventaja de esta configuración es que permite utilizar bandas de frecuencia no licenciadas en los 5,8 GHz.

Finalmente el ancho de banda utilizado en la simulación es de 10MHz, con modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM y esquemas de codificaciones convolucionales de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$. El prefijo cíclico utilizado es de $\frac{1}{8}$.

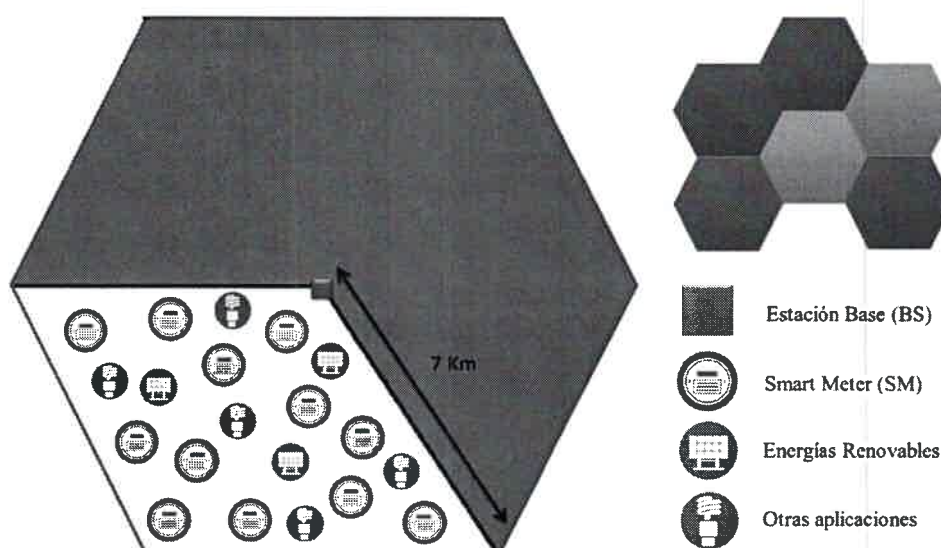


Figura 6.1. Celda WiMAX.

6.3.2. BER/BLER para diversos esquemas de codificación y modulación en una SG.

Las Figuras 6.2 y 6.3 muestran el resultado obtenido tras la simulación. Puede apreciarse la evolución de las curvas de BER vs SNR para diferentes tipos de modulación y esquemas de codificación, asumiendo como modelo de canal una adaptación del SUI-3 para entornos suburbanos [64]. Los mismos son comparados con los resultados teóricos utilizando la función *berfading()* la cual emplea un canal Rayleigh típico, con un grado de diversidad igual a uno.

Todas las simulaciones han sido configuradas para finalizar tras alcanzar un BER menor o igual que 10^{-3} . Se simulan 125 símbolos por cada valor de SNR.

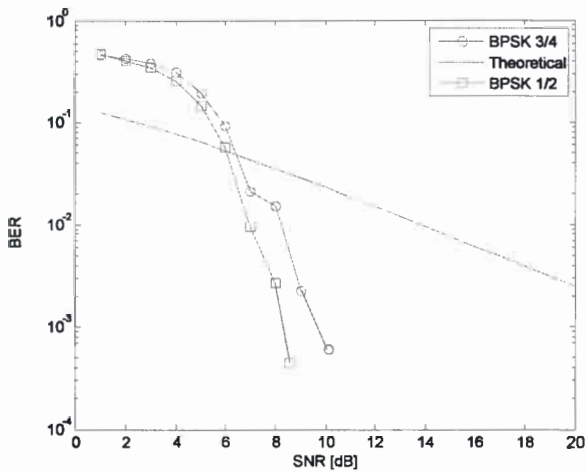


Figura 6.2(a)

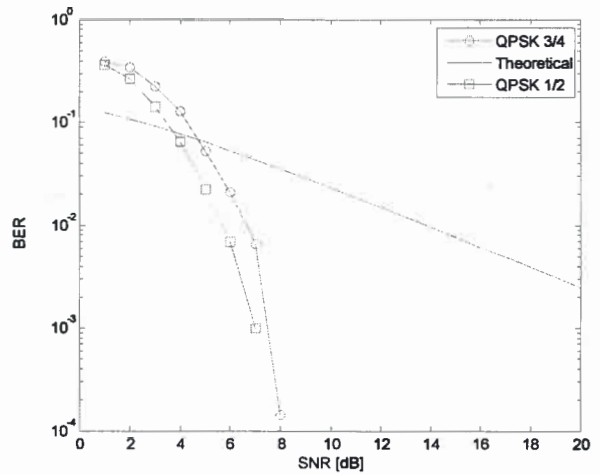


Figura 6.2 (b)

Figura 6.2. (a) Comparación BER para una modulación BPSK. (b) Comparación BER para una modulación QPSK.

Si tomamos como referencia una $BER=10^{-3}$, se aprecia una reducción de la SNR cercana a los 2 dB, por el paso de un esquema de codificación $\frac{3}{4}$ a uno $\frac{1}{2}$, lo que permitiría relajar los requerimientos de SNR (mejorando la cobertura). Sin embargo sabemos que este beneficio tiene un costo en la capacidad de transmisión.

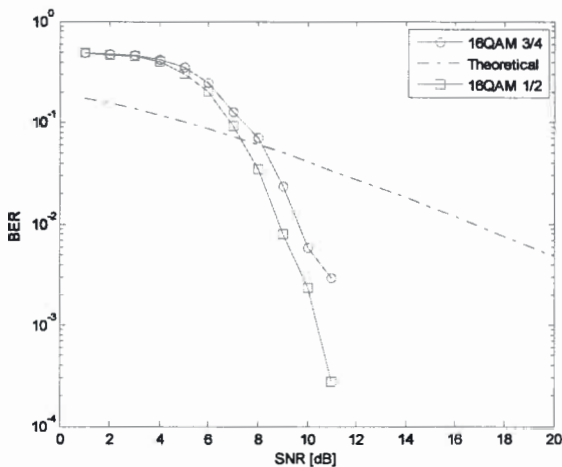


Figura 6.3 (a)

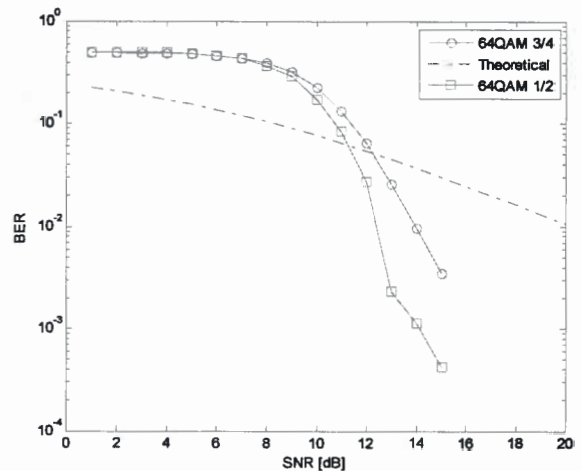


Figura 6.3 (b)

Figura 6.3. (a) Comparación BER para una modulación 16QAM. (b) Comparación BER para una modulación 64QAM.

Estos resultados pueden utilizarse para la formulación de los umbrales a utilizar en un esquema de modulación adaptiva, como se muestra en la próxima sección.

6.3.3. Eficiencia Espectral.

Para encontrar los umbrales de máxima eficiencia espectral, a los que se ajustará el esquema AMC, y así lograr que el enlace se aproxime al límite teórico de capacidad de Shannon (SH), se define [101],

$$SH_H = \log_2(1 + SNR) \text{ ec. 6.1}$$

En donde SH_N es la capacidad de Shannon normalizada.

Basándose en los resultados obtenidos en las Figuras 6.3, definimos la Eficiencia Espectral Normalizada (SEN, *Spectral Efficiency Normalized*)

$$SEN = (1 - BLER) * r * \log_2(M) \text{ ec. 6.2}$$

En donde "M" indica el índice de modulación (2 para BPSK, 4 para QPSK, 16 o 64 para QAM), "r" es la tasa de codificación $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$ y se define a BLER como la probabilidad de que al menos un bit sea corrompido en la transmisión de un bloque de L bits. Matemáticamente se expresa [48],

$$BLER = 1 - (1 - BER)^L \text{ ec. 6.3}$$

En donde L es un bloque de bits. Para las simulaciones que se presentan a continuación el valor asumido fue 64.

Las Figuras 6.4 y 6.5 ilustran la eficiencia espectral para cada una de los esquemas de modulación/codificación estudiado. La curva de capacidad de Shannon es empleada como referencia, dado que la misma es el máximo límite a alcanzar (teórico). El objetivo de esta comparación consta en acercarse a esta curva de referencia utilizando saltos en las modulaciones/codificaciones logrando así aumentar la tasa de transferencia de la comunicación. Las tablas 6.2 y 6.3 resumen las relaciones SNR vs Eficiencia espectral, necesarias para cada tipo de modulación y cada tasa de codificación.

TABLA6.2. SNR y Eficiencia Espectral con $r=1/2$.

Modulación	SNR [dB]	Eficiencia [bps/Hz]
QPSK	7	1
16QAM	11	2
64QAM	15	3

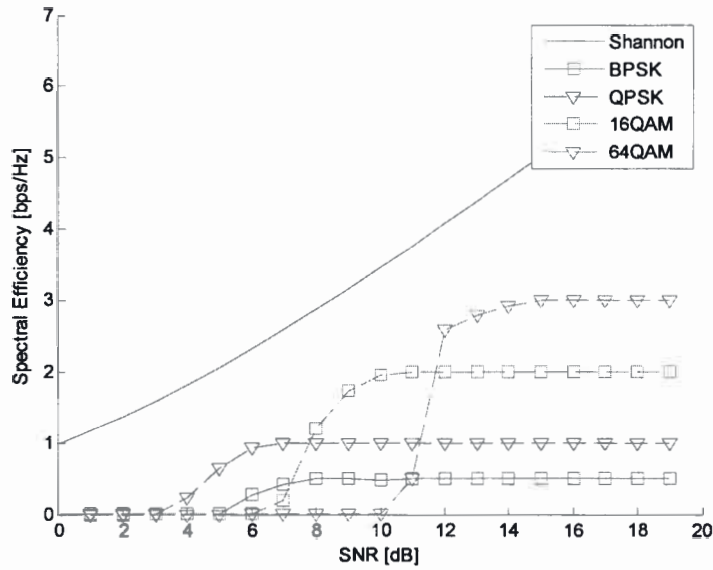


Figura 6.4. Eficiencia Espectral, $r=1/2$.

Puede remarcarse que los resultados para esquemas $3/4$ son más eficientes en cuanto bits/Hz que los obtenidos en esquemas $1/2$, sin embargo la SNR necesaria para el primer caso es mayor que para el segundo. Nuevamente se puede apreciar, en este caso, el compromiso entre cobertura, *throughput* y esquemas AMC.

Los resultados para BPSK no se muestran ya que la eficiencia no es significativa, además se sabe que esta modulación, al ser de bajo nivel, es una de las modulaciones digitales de mayor robustez y se utiliza principalmente en la modulación de pilotos que se aprovechan para la sincronización y estimación del canal.

TABLA 6.3. SNR y Eficiencia Espectral con $r=3/4$.

Modulación	SNR [dB]	Eficiencia [bps/Hz]
QPSK	8	1.5
16QAM	11	3
64QAM	15	4.5

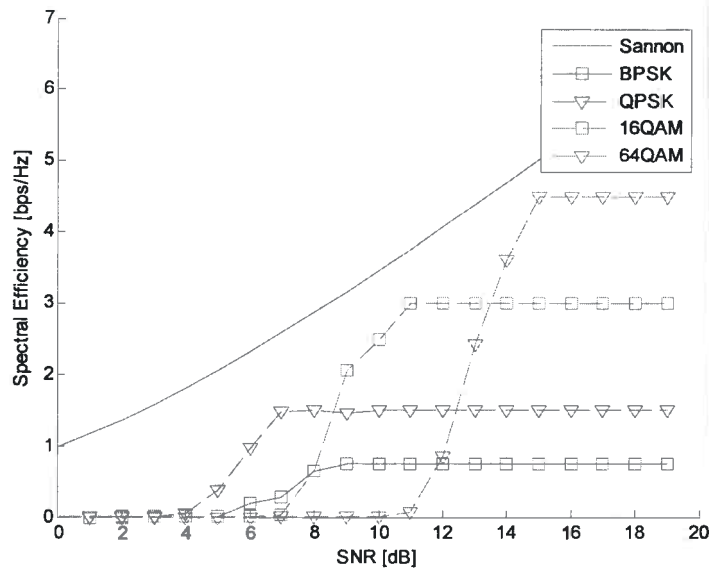


Figura 6.5. Eficiencia Espectral, $r = 3/4$.

El estudio de eficiencia permite desarrollar el mapa de cobertura de la celda, tal como se puede apreciar en la Figura 6.6. Con esta información se podrá realizar un perfil del tráfico y por ende de las aplicaciones que se podrán ofrecer en el marco de la WiGRID. Además en caso de ser necesario este mapa podría utilizarse para que el diseñador de la red celular realice funciones de división de celdas (*splitting cell*) para maximizar el *throughput* en cada una de ellas.

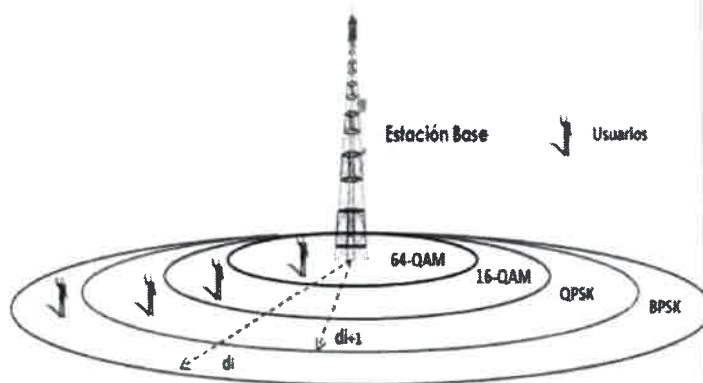


Figura 6.6. Cobertura vs modulación, para una celda WiGRID.

6.3.4. Estudio de throughput para el nivel de enlace.

Un sistema de comunicación típico en el dominio de la distribución, implica principalmente la medición de señales de tensión y corriente. Sin embargo, dentro de una SG, se espera que, además de estos datos, exista información adicional, como por ejemplo el ángulo de fase,

actualización de tarifas en tiempo real, anuncios y alarmas. Además, asumiendo un rol activo por parte de los usuarios, estos ofrecerán excedentes de energía por lo que el flujo de datos bidireccional crecerá. Estos datos adicionales aumentan la tasa de bits requerida. En esta sección se presenta un análisis detallado de la capacidad de transferencia de datos (*throughput*) para una WiGRID en el nivel de “enlace”. A fines de simplificar el modelo numérico, las ecuaciones se evaluarán con valores típicos de la norma 802.16d y 802.16e.

Si se considera, en el dominio temporal, a un símbolo OFDM tal como se ilustra en la Figura 6.7, puede entenderse a esta imagen como el tiempo que ocupa la transmisión de un símbolo que posee 256 sub-portadoras. Este tiempo de símbolo está medido en la capa Física.

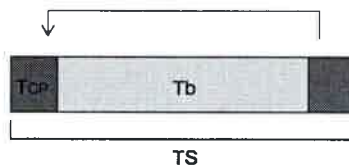


Figura 6.7. Tiempo de símbolo OFDM.

Matemáticamente, la conformación del tiempo de símbolo depende de determinados parámetros que forman parte del diseño del sistema.

$$T_b = \frac{1}{n \times \frac{BW}{N_{ff}}}$$

$$T_s = T_b + T_{cp}$$

$$T_s = T_b + CP \times T_b \quad \text{ec. 6.4}$$

$$T_s = (1 + CP) \times \frac{1}{n \times \frac{BW}{N_{ff}}}$$

$$S_{PHY} = \frac{1}{T_s}$$

En donde “n” es un factor de muestreo, N_m representa al número total de sub-portadoras, T_b es el tiempo utilizado por los símbolos modulados previo agregado del prefijo cíclico. T_{cp} simboliza la duración del prefijo y se expresa en función del porcentaje (definido en “CP”) de tiempo que es copiado y agregado para la conformación del tiempo símbolo a transmitir, T_s .

Finalmente se define a S_{phy} como el ancho de banda que ocupa la transmisión de un símbolo, siempre medido en la capa Física.

Usando estos resultados, la máxima capacidad que puede alcanzarse, C_{PHY} , se obtiene con la siguiente expresión, [48]

$$C_{PHY} = B * S_{PHY} [bps] \text{ ec. 6.5}$$

De acuerdo con el estándar IEEE 802.16d-e, un típico símbolo OFDM posee un total de 256 sub-portadoras (N_{fft}), de las cuales solo 192 son utilizadas para transmisión de datos generados por las capas superiores (N_{data}). En la tabla 6.4 se ejemplifican valores típicos de los parámetros utilizados.

TABLA 6.4. Parámetros de configuración.

Parámetros	Valores
N_{FFT}	256
N_{data}	192
n	8/7 para BW múltiplos de 1,75 MHz 86/75 para BW múltiplos de 1,5MHz 144/125 para BW múltiplos de 1,25 MHz 316/275 para BW múltiplos de 2,75 MHz 57/50 para BW múltiplos de 2 MHz 8/7 para cualquier otro caso
CP	¼, 1/8, 1/16 o 1/32

Por ejemplo, para un $BW = 10\text{MHz}$, $n=144/125$ y un $CP = 0.25$, el $S_{PHY} = 36000$ símbolos por segundo.

El número total de bits por símbolo (definido en este documento como “B”) puede calcularse para la capa PHY como,

$$B = N_{data} * BP * r [bits / símbolo] \text{ ec. 6.6}$$

En donde “BP” representa la cantidad de bits que pueden modularse por sub-portadora y “r” la tasa de codificación. La tabla 6.5 resume las modulaciones, tasas de codificación permitidas por la norma y bits por símbolo que pueden alcanzarse.

TABLA 6.5. Bit por símbolo transmitido.

Modulación	Bits/carrier	CR	Bits/símbolo
BPSK	1	¼	96
QPSK	2	½	192
QPSK	2	¾	288
16QAM	4	½	384
16QAM	4	¾	576
64QAM	6	½	576
64QAM	6	¾	864

La modulación 64QAM con tasa de codificación $\frac{1}{2}$ no es utilizada ya que presenta la misma capacidad que el esquema 16QAM $\frac{3}{4}$, por lo que conviene utilizar un esquema de menor nivel de modulación, debido a su mejor performance frente al canal.

Sin embargo, al escalar hacia la capa de acceso, el rendimiento referido a la capacidad se ve alterado, principalmente debido a las cabeceras (*headers*) del protocolo MAC y la estructura de conformación de las tramas a transmitir en los esquemas TDMA/TDD.

En primer lugar, se escoge un tiempo de trama (la selección del mismo se estudia con más detalle en la siguiente sección) en el cual se determina la ocupación que tendrá el *downlink* y el *uplink*, cuyo fin es sincronizar la recepción de las tramas y estimar el canal de comunicaciones. Luego se realiza el agregado de *headers*, *Up-Link header* (UL), *Down-Link header* (DL) y campos de control de cabeceras (FCH, *Frame Control Header*) tal como se detalla en el estándar. En términos de símbolos OFDM, UL necesita dos símbolos, mientras que el campo DL y FCH solo ocupan uno. Además se reserva un tiempo para mensajes de tipo *broadcast*, destinados a gestionar el uso del *downlink* (DL-MAP) y el *uplink* (UL-MAP). Todos estos símbolos de cabeceras se modulan en BPSK $\frac{1}{2}$, por las razones previamente mencionadas acerca de la robustez de estos esquemas, y la criticidad de la información transmitida. El lector puede remitirse a la Figura 5.4 para obtener una ilustración de lo mencionado.

Para poder cuantificar y evaluar el impacto de los *headers* en sistemas TDMA/TDD, definimos la siguiente expresión matemática,

$$MAP = \frac{(x + IE * usr)}{N_b} \quad \text{ec. 6.7}$$

En donde MAP representa el tamaño de las cabeceras DL-MAP y UL-MAP, “usr” es el número de usuarios simultáneos que se pretende servir por *frame*, “IE” indica la cantidad de bits necesaria a transmitir (32 para el DL y 48 para el UL), “N_b” constituye a la cantidad de bits útiles que puede contener un símbolo OFDM (en este caso siempre es 96 ya que como previamente se dijo, la modulación utilizada es BPSK $\frac{1}{2}$). Finalmente “x” es una *overhead* que vale 64 bits en el caso de analizar el DL y 96 bits para el UL.

Otro aspecto relevante en el diseño y planificación de una WiGRID para esquemas con duplexión TDD, es la determinación de los tiempos de transición “Transmisor/Receptor” (TTG, *Transmit/receiver Transition Gap*) y “Receptor/Transmisor” (RTG, *Receive/transmit Transition Gap*). El primer caso (TTG) se puede entender como el tiempo que existe entre una ráfaga que se transmite en sentido descendente (*downlink*) y la subsecuente ráfaga que se transmitirá en el sentido ascendente (*uplink*). Durante este período la BS conmuta de su etapa de transmisión a la etapa de recepción, mientras que las SSs conmutan de su modo de recepción a su modo de transmisión. En el segundo caso (RTG) se entiende como la brecha

temporal entre la transmisión de una ráfaga por el enlace *uplink* y la subsecuente ráfaga que la BS transmite por el *downlink*. En este caso la BS conmuta de su etapa de recepción a la de transmisión, mientras que las SSs realizan la operación inversa.

El estándar define a los términos TTG y RTG en función de las ranuras de transmisión física (PS, *Physical Slots*). Una PS queda matemáticamente representada como,

$$PS = 4 / F_s \quad \text{ec. 6.8}$$

En donde F_s es la frecuencia de muestreo que viene dada por $F_s = n * BW$ (“n” y “BW” se corresponden a los presentados en la tabla 7.1). En [65] se listan algunos valores típicos que asumen estas variables, a modo de resumen podemos decir que $TTG = RTG$, y ambos deben ser mayores a $5 \mu\text{seg}$ y menores a $100 \mu\text{seg}$. Estos límites tienen una gran importancia en la planificación de cobertura máxima para una celda, pocas veces remarcadas en la literatura. Es por esto que el modelo diseñado tiene en cuenta la siguiente restricción,

$$TTG = RTH = \frac{\min\left\{\frac{D_{\max}}{3 \times 10^8}, 100 \mu\text{seg}\right\}}{T_{\text{sofdm}}} \quad \text{ec. 6.9}$$

En donde D_{\max} representa la distancia máxima en donde se encuentra el dispositivo y T_{sofdm} es el tiempo del símbolo OFDM a enviar.

La condición viene dada ya que al utilizar un esquema de duplexión temporal, la conformación de las tramas y la sincronización en las transiciones son cruciales para el correcto funcionamiento del sistema. El sistema debe suponer que el tiempo propio de la propagación de una ráfaga de información al borde de la celda es menor que la máxima tolerancia de transición máxima ($100 \mu\text{seg}$) para no perder sincronismo. Se remarca que la cobertura no es solo un problema que involucra niveles de SNR, por ejemplo, si un móvil posee una SNR lo suficientemente elevada para realizar una comunicación fuera de los límites de la celda, la misma no podrá realizarse si el tiempo de propagación supera el límite establecido ya que cuando la SS transmita la información, la BS habrá conmutando de modo escucha a modo transmisión por lo que la información se perderá.

Basándonos en todos los cálculos presentados, se calcula el peso de las cabeceras, tanto para el enlace descendente como el ascendente.

$$\begin{aligned} S_{hdl} &= S_{pdl} + S_{fch} + DL_MAP + UL_MAP + TTG \\ S_{hul} &= S_{breq} + S_{RNG} + S_{pul} * n_{SS} + RTG \end{aligned} \quad \text{ec. 6.10}$$

En donde S_{pdl} son los símbolos asociados al preámbulo utilizado para la estimación del canal, S_{fch} es el símbolo reservado para para control de trama, S_{breq} representan a los símbolos

reservados para el pedido de BW por parte de los usuarios, S_{RNG} son los símbolos reservados para la etapa de *ranging* (contienda para pedir aumento de BW, calidad de servicio, etc.), S_{pu1} se interpreta como la cantidad de símbolos a utilizar por cada usuario, “nss” son la cantidad de SSs que transmitirán en simultaneo, por trama.

Entonces el total de símbolos necesarios en la cabecera MAC queda definido como,

$$S_{hMAC} = S_{hul} + S_{hdl} \quad \text{ec. 6.11}$$

El paso previo al cálculo del *throughput* a nivel MAC consiste en agregar una codificación extra (codificación de canal) para aumentar la robustez en la comunicación. El estándar IEEE 802.16 permite implementar Reed Solomon 239/255 (RS-CC, *Reed Solomon Coding Channel*).

La siguiente ecuación expresa la capacidad máxima alcanzada en la capa 2, para el sistema propuesto,

$$C_{MAC} = B * \left(\frac{239}{255} \right) * (S_{PHY} - S_{hMAC}) [bps] \quad \text{ec. 6.12}$$

En resumen el *throughput* queda expresado en función de la distancia existente entre la BS y los SSs (impacto del canal en la relación SNR), la cantidad de usuarios (esquemas de acceso y duplexión), el tiempo de trama y las cabeceras necesarias. Aumentar el número de usuarios no solo complejizarían el acceso, sino también haría que las cabeceras tuvieran un mayor peso, reduciendo la cantidad de símbolos útiles para los usuarios (aumentar el número de usuarios aumenta directamente los *headers* DL-MAP y UL-MAP).

En la tabla 6.6 se computan los *throughput* calculados en cada capa, para cada esquema de modulación/codificación presentados. Se consideró para este cálculo un ancho de banda (BW) de 10 MHz, 50 usuarios concurrentes y una trama de 20ms.

TABLA 6.6. Cálculo de *Throughputs*.

Modulación	CR	SNR	CPHY [Mbps]	CMAC [Mbps]
BPSK	½	7	3,45	2,79
QPSK	½	7	6,91	5,58
QPSK	¾	8	10,36	5,58
16QAM	½	11	13,82	11,17
16QAM	¾	11	20,73	16,74
64QAM	¾	15	31,10	25,11

De los resultados obtenidos se aprecia una reducción significativa al escalar de la capa PHY a la capa MAC. Sin embargo, si se logra mantener una relación SNR superior a los 15 dB,

sirviendo a 50 usuarios en simultáneo la velocidad de transmisión es de 502 Kbps por usuario (si el enlace es simétrico 251 Kbps para subida y 251 Kbps para descarga), lo que cumple con la mayoría de los requisitos de capacidad para aplicaciones en una SG, presentados en los capítulos anteriores.

Ejemplo de implementación. Considerando una aplicación WAMI (*Wireless Advanced Metering Infrastructure*), tal como se presenta en [66], en la cual la BS encuesta a cada SS cada 240 segundos, utilizando como calidad de servicio técnicas de “*Best Effort*”, y a su vez cada SS (en este caso SM) genera un paquetes de 125 bytes por segundo [66], entonces cada *Smart Meter* generará cada 4 minutos,

$$125 \text{ [Bytes/seg]} * 8 * 240 = 240 \text{ [Kbits]} \text{ ec. 6.13}$$

Siendo estos 240 Kbits la información almacenada en 4 minutos, se aprecia que este requisito es ampliamente cubierto ya que el usuario, en el modelo propuesto, puede transmitir hasta 251 Kbps. Finalmente se infiere, con el mismo razonamiento, el número máximo de usuarios que puede servir una BS,

$$240 \text{ seg.} * 50 \text{ (usr/seg)} = 12,000 \text{ [usuarios]} \text{ ec. 6.14}$$

Cabe destacar que el cálculo realizado tiene como objetivo simplemente ilustrar una idea. En el mismo, se ha despreciado el tiempo que conllevaría la asignación de recursos aunque los mismos podrían incluirse en el margen restante.

6.4. Conclusiones.

En este capítulo se presentó el modelo realizado para la evaluación, planificación y validación de enlaces inalámbricos para la WiGRID. Esta etapa solo estudió el comportamiento de enlaces puntuales, dejando la evaluación del sistema como tópico del siguiente capítulo. Las simulaciones realizadas tuvieron en cuenta todos los aspectos referidos a la capa PHY relevando la importancia de los codificadores convolucionales, esquemas de modulación adaptivos y selección de parámetros (BW, cantidad de sub-portadoras, esquemas de acceso y duplexión).

Los resultados encontrados tienen como principal objetivo determinar los umbrales de SNR para cada posible esquema de modulación/codificación. Como se explicó en el capítulo anterior, estas combinaciones se mapean en una tabla que define indicadores del estado del canal (CQICH). De esta forma la BS podrá programar los bloques de recurso a asignar a cada SM de forma óptima, dependiendo del CQICH que se le establezca a cada usuario.

Dado que diversas implementaciones pueden realizarse de forma asilada (utilizando solo una celda), el estudio del *Link-Level Simulation* suele ser suficiente para la planificación del proyecto. Esta es la razón por la cual se realizaron dos estudios a nivel de enlace a lo largo del capítulo. El primero, que se presenta en la sección 6.3, realiza una investigación acerca

de los umbrales necesarios para la utilización de esquemas AMC, haciendo un fuerte hincapié en un modelo de canal hostil para la celda. Sin embargo este estudio desprecia las interferencias entre usuarios, y no tiene en cuenta a celdas vecinas. Estos resultados son útiles para diagramar coberturas extensas en zonas aisladas, en donde solo es necesario una estación base.

Todos estos resultados constituyen la primera etapa en la evaluación de viabilidad de una WiGRID, para diversos escenarios.

CAPÍTULO VII

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PERFORMANCES DE UNA WiGRID. ESTUDIO PARA ZONAS URBANAS.

7.1. Introducción.

Como se ha especificado en el capítulo anterior, los modelos de simulación de nivel de enlace (*Link-Level Simulation*) estudian la transmisión entre una estación base y uno o más usuarios, pero siempre como si fueran enlaces punto a punto. Generalmente se concentran en modelar la capa Física, y la métrica fundamental que se utiliza para evaluar el rendimiento está basada en la capacidad de transmisión que puede alcanzarse en función de la SNR percibida. Sin embargo, en este nivel de simulación no se tratan aspectos de diseño cruciales como lo es la interferencia producida por los mismos usuarios u otras BS, los esquemas de reuso de frecuencia en los “clusters de celdas celulares” o el estudio del *throughput* en capas superiores (IP, TCP y de Aplicación). Estas consideraciones son contempladas en la etapa conocida como Simulación a Nivel de Sistema (*System Level Simulation*). En la Figura 7.1 ilustra este concepto.

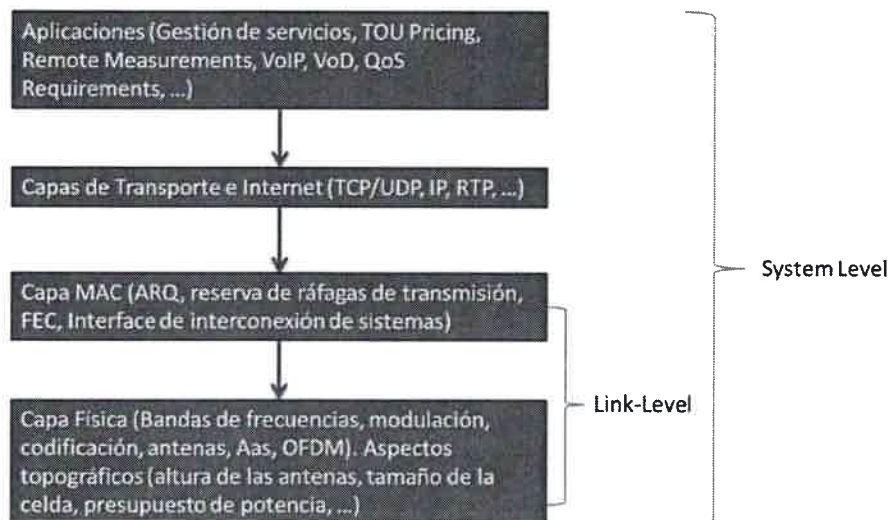


Figura 7.1. Modelo de simulación.

La fase de *System-Level Simulation* es la que se encarga de evaluar el funcionamiento completo del sistema. La bibliografía consultada propone diversos métodos para el diseño de modelos, sin embargo los métodos propuestos en [69] [70] [71] no son flexibles ni escalables, resolviendo siempre problemas *ad-hoc*.

Esta es la razón por la que en este capítulo se presenta un modelo de simulación de un sistema completo, desarrollado en Matlab®, que sintetiza todos los conceptos tratados en los últimos tres capítulos de este documento.

7.2. Topología de Red. Consideraciones de Implementación.

Esta sección describe la metodología recomendada por el WiMAX Forum [72] para la evaluación de sistemas bajo la norma IEEE 802.16 (en sus revisiones “e”, “m”, “n” y “p”). Aplicable para escenarios en donde la movilidad de los suscriptores sea baja/media, esto significa en que los cambios de posición sean leves durante la transmisión de tramas de información. Se asume una perfecta sincronización en frecuencia y temporal entre BS y SM, así como una estimación ideal del canal de comunicaciones.

7.2.1. Modelado del Clúster de Celdas.

Se ha explicado en el capítulo anterior que el rendimiento de una transmisión inalámbrica se determina, por la relación de señal-ruido (SNR). En WiMAX, así como en la mayoría de las redes celulares, la “interferencia” de BS vecinas puede afectar a la señal mucho más que el ruido térmico de los equipos, por lo que en el modelado se utiliza la relación de señal-interferencia-ruido (SINR). Para determinar la interferencia, necesitamos una representación exacta de los diversos sectores (3 sectores de 120° como se presentó en capítulo anterior) de una celda y sus vecinas circundantes. La Figura 7.2 muestra un modelo de sistema celular que utiliza una configuración de 19 celdas.

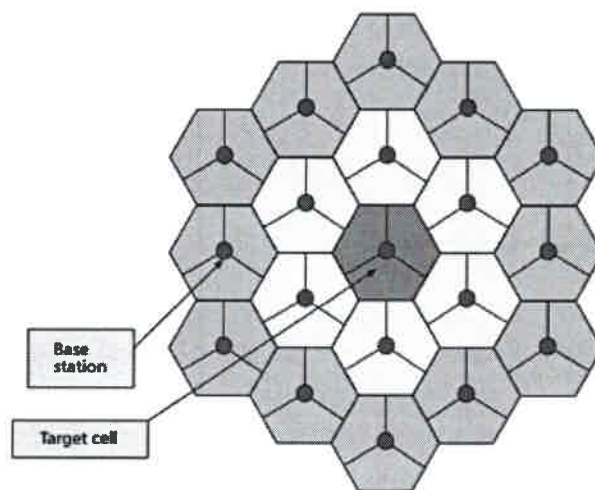


Figura 7.2. Modelo para el estudio “System-Level Simulation”. [83].

Se puede distinguir un primer nivel compuesto por seis células que rodean la celda central (la cual será la analizada). En un segundo nivel existen 12 celdas más que cierran el modelo. Cada célula tiene tres sectores de forma predeterminada, por lo que hay 57 sectores totales.

Un número aleatorio de SM se ubica en cada uno de estos 57 sectores. Cada SM corresponde a una sesión de usuarios activos que se ejecuta durante una determinada duración de un “drop”. Se define como “drop” a una corrida de simulación que contempla un conjunto dado de usuarios durante para una determinada cantidad de tramas de datos enviados. Al comienzo de cada “drop”, los abonados están asociados con una BS y sector específico.

7.2.2. Modelo de Interferencia.

Una de las más importantes ventajas de los esquemas de acceso OFDMA, radica en la posibilidad de utilizar un “factor de reuso de frecuencia entre celdas” igual a “1”, lo que significa que pueden escogerse las mismas frecuencias en cada celda vecina. Esto permite despliegues rápidos ya que no se requiere ninguna planificación de frecuencias en el diseño del sistema celular. Dicho atributo se era la principal característica de los de los sistemas de múltiple acceso por división de código (CDMA).

La interferencia vista por un SM en el enlace descendente o por la BS en el enlace ascendente es típicamente selectiva en frecuencia y tiempo.

Los simuladores de red deben modelar la interferencia utilizando un modelo de canal realista, que incluye tanto el desvanecimiento lento y rápido de las señales. El modelo propuesto adopta una simplificación que reduce la complejidad de dicha simulación:

- Solo se tendrán en cuenta desvanecimientos selectivos en frecuencia y tiempo para las fuentes de mayor intensidad. Esto se traduce numéricamente en realizar un análisis del perfil de canal de cada usuario, escogiendo solo las frecuencias en donde el *fading* es significativo, interpolando el resto de las componentes.

Las fuentes de interferencia restantes se modelan como ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) con variaciones temporales según un proceso de desvanecimiento de Rayleigh.

7.2.3. Modelo de Reuso de Frecuencias.

La red se divide en clústeres de “N” celdas (cada celda dentro del clúster está configurada con un conjunto de frecuencias distinta a las vecinas), “S” denota los sectores de cobertura por celda, mientras que “K” las diferentes frecuencias que se alojarán por cada celda. Este tipo de configuración se lo suele mencionar en la bibliografía como patrón de reuso $N \times S \times K$.

La elección de un correcto plan de reutilización de frecuencias, no solo representa un ahorro en la compra y reserva de las licencias de uso del espectro, sino que también es un punto clave para reducir las interferencias que aumentan el piso de ruido en el sistema de comunicaciones. La Figura 7.3 muestra algunos de los más utilizados arreglos.

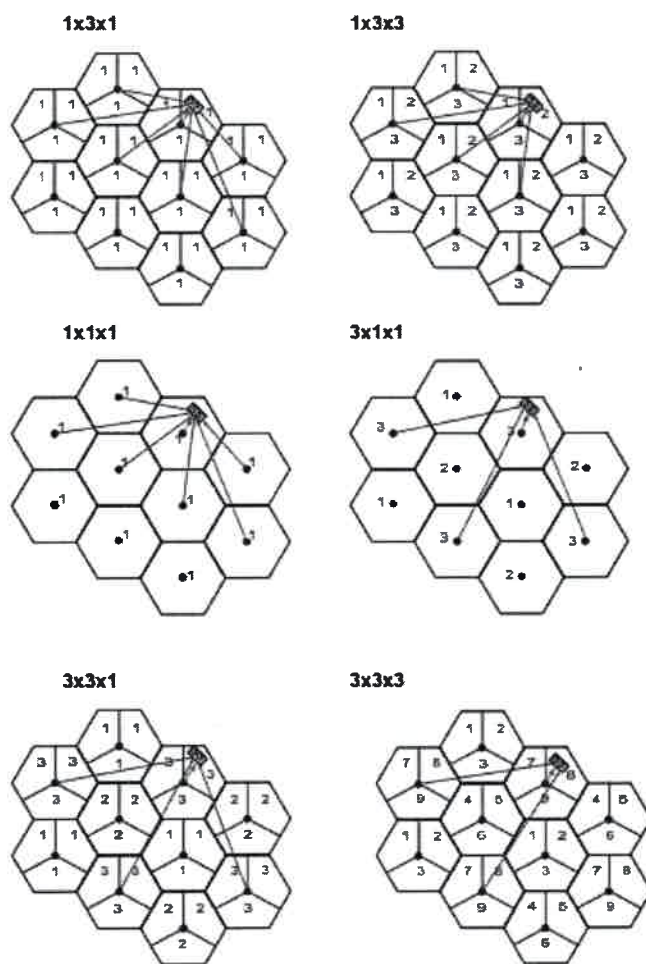


Figura 7.3. Distintas configuraciones de clústeres [83].

7.2.4. Parámetros de configuración de la Red.

En las Tablas 7.1, 7.2 y 7.3 se presentan los parámetros de configuración generalmente empleados en la configuración de una red, BS y SS, respectivamente. Los valores utilizados en la simulación son resaltados en “negrita”.

TABLA 7.1. Configuración de Red.

Parámetros	Descripción	Valores
Nc	Cantidad de celdas	19
S	Cantidad de sectores	1, 3, 4, 6
R	Distancia entre BS	0.5 a 30 Km (0.5)
Ors	Angulo de Inclinación de las antenas sectoriales [82]	S=3:Ors=30, 150 o 270 S=6:Ors=60, 120, ..
K	Cantidad de frecuencias por red	1, 2, 3, 4, 5
Frs	Frecuencias por sector en cada BS	1, 2, 3, 4, 5, 6
	Frecuencias de Operación	2.0 - 3.5 - 5.8 GHz
	Duplexión	TDD

TABLA 7.2. Parámetros de configuración para cada BS.

Parámetros	Descripción	Valores
P	Potencia de Transmisión	30-51 dBm (43 dBm)
PAR	Peack to Average backoff por BS	9-11 dB
H	Altura de las BS	10 – 50 m
G	Ganancia de antena por sector	16 dBi
O	Ancho del haz definido en [82]	$S=3 : O=70$
GFR	Ganancia Frente espalda	25 dB
MTX	Antenas de transmisión	1, 2, 3, 4...
MRX	Antenas de recepción	1, 2, 3, 4...
dRS	Espaciado entre antenas	Múltiplo de $\lambda/2$
NF	Figura de ruido	4-10 dB (9dB)
HW	Perdidas adicionales	2dB

TABLA 7.3. Parámetros de configuración para cada SS.

Parámetros	Descripción	Valores
P	Potencia de Transmisión	20-45 dBm (23 dBm)
PAR	Peack to Average backoff por BS	9-11 dB
H	Altura de las BS	1.5 – 7 m
G	Ganancia de antena por sector	0 dBi
O	Ancho del haz definido en [82]	Omnidireccional
MTX	Antenas de transmisión	1, 2, 3, 4...
MRX	Antenas de recepción	1, 2, 3, 4...
dSS	Correlación entre antenas	0-0.7 (0.5)
NF	Figura de ruido	4-10 dB (9dB)
HW	Perdidas adicionales	2dB

7.3. Modelos de simulación de sistemas WiMAX.

Existen diversos tipos de modelos disponibles en Internet útiles para el análisis de sistemas inalámbricos basados en la tecnología WiMAX. Sin embargo muchos de ellos no son fiables o presentan fallas técnicas en su implementación. A continuación se presenta un breve estudio que resume los modelos de referencias más utilizados en publicaciones y trabajos, disponibles para diferentes plataformas.

Modelos en NS2

- WiMAX Forum's NS2 Model, Release 1 [73]
- Chang Gung University, Taiwan, WiMAX NS2 Simulator [74]
- National Institute of Standards and Technologies (NIST), NIST IEEE 802.16 NS2 Simulator [75]

Librerías en MATLAB

- WiMAX 802.16e PHY and MAC [76]

- OFDM-based Wireless BroadBand System Simulator [77]

Simuladores comerciales:

- CoWare, Signal Processing Designer (SPD), www.coware.com
- Opnet Technologies, www.opnet.com/wimax
- Scalable Networks Technologies, Qualnet, www.qualnet.com

Librerías para implementaciones en FPGA

- Scalable OFDMA Engine for Mobile WiMAX (MATLAB based Model) [78]
- MATLAB-based WiMAX OFDM256 PHY reference design [79]
- WiMAX OFDM Library Reference Design [80]

Como se mencionó, el inconveniente de los citados modelos radica en la poca versatilidad que poseen para adaptarse a las continuas reformas que el estándar incluye en cada revisión, quedando rápidamente desactualizados.

Para el presente capítulo se optó por adaptar un modelo inicialmente creado para LTE por la Universidad de Viena [81]. La justificación de esta elección se centra principalmente en las similitudes de LTE *Advanced* con las recientes revisiones de WiMAX. Además el modelo ha sido implementado en su totalidad en la plataforma MatLab®, lo que permite integrarlo de manera sencilla con los desarrollos realizados en el capítulo anterior. Para la implementación se respetaron todos los parámetros expuestos en la sección 7.2.4. A continuación se presenta la estructura del modelo utilizado y se detallan algunos parámetros que no fueron mencionados previamente.

A. Configuración General.

Ancho de banda: 10 MHz, que permite alojar 50 bloques de recursos (RB, *Resource Block*). Cada RB puede mapearse con un CQICH diferente.

Modo de transmisión: definido en TS 36.213-820 [84].

Actualización del *Throughput*: Basándose en [85], el *throughput* promedio $T_k(t)$, para cada usuario “k”, es actualizado usando un ventaneo exponencial

$$T_k(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(t) + \frac{1}{t_c} R_k(t), & k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k(t), & k \neq k^* \end{cases}$$

en dónde k^* representa al usuario estudiado, mientras que $R_k(t)$ es la tasa que el usuario k -ésimo obtuvo. “ t_c ” indica la longitud de la ventana.

Modelo MIMO de Transmisión: puede optarse por el modo *Open Loop Spatial Multiplexing* (OLSM), *Close Loop Spatial Multiplexing* (CLSM) o *Transmission Diversity* (TxD).

B. **Perdidas Macroscópicas (*Pathloss*).**

Modelos implementados: Atenuación por espacio libre; COST-231 (para micro-celdas COST231-Walfish-Ikegami; para macro-celdas COST231-Hata); TS36942 [86] y TS25814 [87].

C. **Shadow Fading.**

Agrega al estudio de *PathLoss* los fenómenos causados por obstáculos e irregularidades del terreno. Particularmente pueden configurarse los siguientes parámetros:

- i. AWGN: Canal de ruido blanco gaussiano.
- ii. Modelos de canal SUI.
- iii. Flat Rayleigh: Canal incorrelacionado en tiempo y frecuencia con distribución de Rayleigh.
- iv. Flat Rayleigh corr: Canal correlacionado en tiempo y frecuencia con distribución de Rayleigh.
- v. Modelo de Tap-Delay: PedA, PedB, PedBcorr, VehA, VehB, TU, RA, and HT [88].

D. **Desvanecimiento (*Microscale Fading*).**

mientras que los puntos B y C se caracterizan por ser dependientes de la posición e invariantes en el tiempo, el Fading de micro-escala es modelado como un proceso dependiente del tiempo. Modelos implementados: ITU Pedestrian A, ITU Pedestrian B, ITU Vehicular A, ITU Vehicular B, todos especificados en [88]. Además se incorporó una versión adaptada de la recomendación del ITU para sistemas OFDM de banda ancha [89].

E. **Smart Meters.**

Para las simulaciones que se realizarán se configurarán 150 SM por sector.

F. **BS.**

Para la asignación de recursos, el modelo contempla tres programas: “Round Robin”, “Best CQICH” o “Proportional Fair”. Utilizando los umbrales obtenidos en el capítulo anterior, sección 6.4, se empleará la técnica de “Mejor CQICH” para todas las simulaciones expuestas.

A modo de clarificar el proceso que realiza el simulador, se presenta el principio de funcionamiento escrito en pseudocódigo:

```
for “cada símbolo transmitido” do
  move “cada SM”
  if “SM está fuera de la Región de interés a analizar” then
    relocate “SM de forma aleatoria dentro de la región”
  end
  for “cada Bs” do
    Recibe el nivel SINR reportado por los SM y asigna un CQICH.
  end
for “cada SM” do
```


1. *Estimación del Canal – MIESM [90] – SINR*
2. *SINR – AMC – BLER*
3. *Realimenta con la BS la nueva información.*

end

end

La implementación en MatLab® respeta la separación de esta estructura realizada en pseudocódigo, permitiendo el agregado de nuevas funcionalidades y algoritmos.

En la tabla 7.4 se completa la parametrización del modelo simulado. La misma se adiciona a las configuraciones ya presentadas en las tablas 7.1, 7.2 y 7.3.

TABLA 7.4. Parámetros de configuración generales para cada SM.

Parámetros	Valor
Prefijo Cíclico (G)	12,5%
Procesos HARQ para la retransmisión	8
Modelo de Tráfico	Round Robin Traffic
Estimación del canal	MMSE
CQI	15 niveles

7.4. Estudio de Cobertura.

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la simulación de una WiGRID configurada como se detalló en las secciones anteriores. Los cálculos que se realizan están siempre en función de la relación SINR, específicamente se utiliza la SINR computada por sub-portadora, previa ecualización del símbolo recibido [91]. Se ha puesto un especial interés en el modelado del canal urbano, teniendo en cuenta su correlación espacial y temporal, dentro del marco de un sistema celular. Para lograr esto el modelo se divide en tres partes (puntos B, C y D ya mencionados), que luego se combinan para obtener la expresión de ecualización para el símbolo en estudio.

7.4.1. Consideraciones en la determinación de umbrales de SNR para esquemas AMC.

Para este estudio, se realiza una simplificación del nivel enlace, ya que el principal atenuante radica en las interferencias entre usuarios y BS propias de la gestión del sistema. Se utiliza un canal AWGN para el cálculo de los mismos. Esta reducción de complejidad en el modelo de canal, se justifica dado que los resultados obtenidos serán ponderados con los modelos de interferencia que se desarrollarán a continuación, los cuales contemplan sistemas de múltiples BS.

Para medir la calidad de canal por sobre el cual se transmitirá los datos de alta velocidad de enlaces inalámbricos 4G, la asociación 3GPP y WiMAX han definido el indicador de calidad de canal (CQI, *Channel Quality Indicator*). No existe allí una formulación determinista para

este indicador, solo se especifica que el valor de CQI es tal que debe existir una probabilidad de al menos 0.9 para transmitir el bloque de datos correctamente, es decir un BLER de hasta 10% [68].

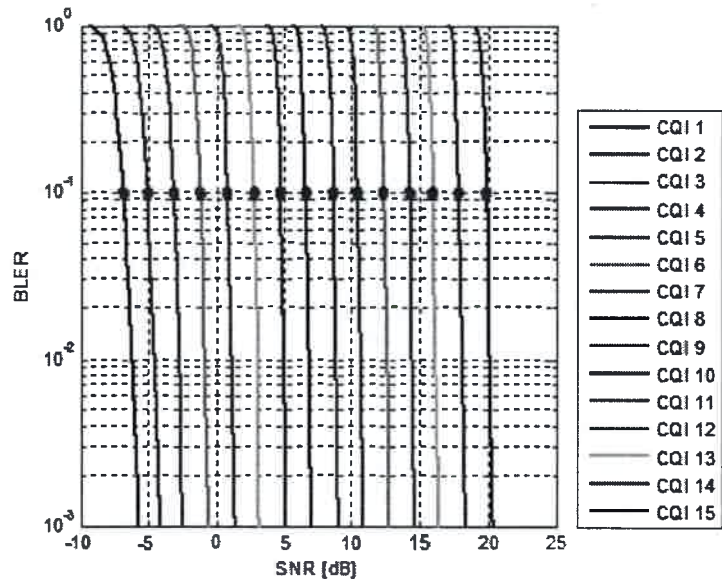


Figura 7.4. BLER vs SNR para un canal AWGN.

La Figura 7.4 presenta de manera gráfica los rendimientos obtenidos para los 15 diferentes esquemas de modulación/codificación presentados; mientras que la Tabla 7.5 releva los nuevos umbrales que se utilizarán en la siguiente etapa.

TABLA 7.5. Mapeo de CQI – SNR requerida.

CQI Index	Modulación	Bits de codificación por bloques de 1024 b	Umbral [dB]
0		FUERA DE RANGO	
1	QPSK	78	-6,936
2	QPSK	120	-5,147
3	QPSK	193	-3,180
4	QPSK	308	-1,253
5	QPSK	449	0,761
6	QPSK	602	2,699
7	16QAM	378	4,694
8	16QAM	490	6,525
9	16QAM	616	8,573
10	64QAM	466	10,370
11	64QAM	567	12,290
12	64QAM	666	14,170
13	64QAM	772	15,890
14	64QAM	873	17,810
15	64QAM	948	19,830

Los diagramas de cobertura que se exhiben a continuación, se encuentran en función de la SINR (en dB) percibida por cada SM. Para poder realizar el posterior estudio de *throughputs*, los resultados son mapeados directamente con las CQICH percibidas. En la Figura 7.5 representa el efecto producido por las pérdidas macroscópicas (particularmente utilizando un modelo TS 36942 como se mencionó en las secciones anteriores).

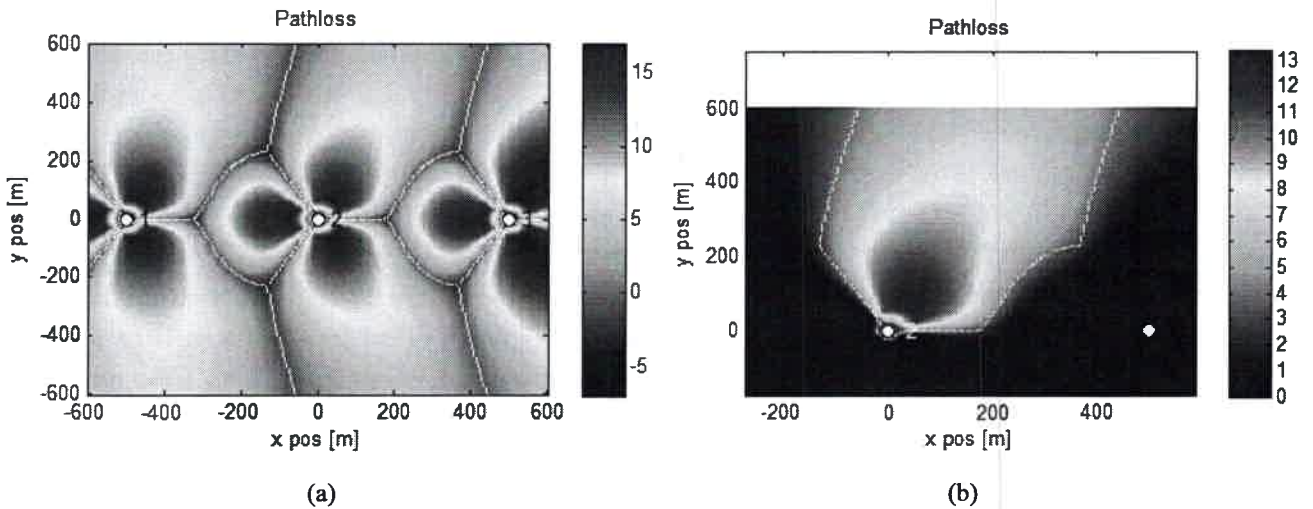


Figura 7.5. Pathloss. (a) Cobertura de celdas en función del CQICH percibido. (b) Análisis de un sector.

En la en la Figura 7.6 se consideró el agregado del efecto del *shadowing* sobre el modelo así como consideraciones de desvanecimiento de micro escala. En este escenario más realista, con un mayor grado de degradación, se procederá a evaluar el rendimiento del sistema.

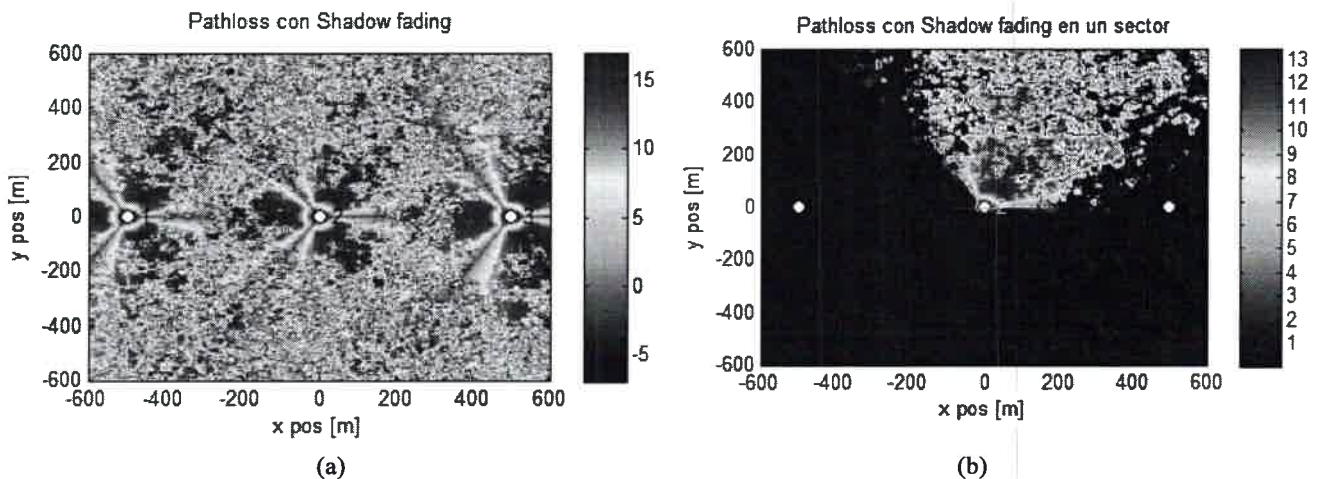


Figura 7.6. Efecto del agregado del Shadow fading. (a) Cobertura de celdas en función del CQICH percibido. (b) Análisis de un sector.

En ambas figuras pueden apreciarse 3 celdas contiguas con sus respectivos diagramas de radiación, identificando fácilmente cada sector de 120°.

Cabe destacar que en la mayoría de la bibliografía consultada durante el desarrollo de la tesis, se apreció que los resultados presentados solo tenían en cuenta modelos macroscópicos, encontrando una carencia de modelos que realicen un estudio de mayor profundidad tal como se presenta en este trabajo.

7.5. Capacidad del sistema.

El cálculo del *throughput* dentro del sistema tiene una dificultad: la ubicación de los SM. Como se pudo apreciar en las figuras anteriores, los efectos del canal producen importantes degradaciones sobre los niveles de señal recibida para diferentes puntos en el espacio, por lo que la ubicación exacta de cada SM juega un rol fundamental en este estudio. Dado que no se puede contar con esta información, se procedió a ubicar 50 SM por cada sector de cada BS. Los dispositivos realizan un barrido desde el centro de cada BS hacia los límites de la Región de Interés. Se utiliza como tiempo de simulación 10 unidades TTI (*Transmission Time Interval*), que constituyen tramas (en este caso de 10 ms). Los TTI encapsulan datos de capas superiores en *frames* que se transmitirán por el radio enlace. La Figura 7.7 ilustra este proceso. Los puntos 1, 2 y 3 denotan 3 BS vecinas. La simulación comienza desde la BS 2.

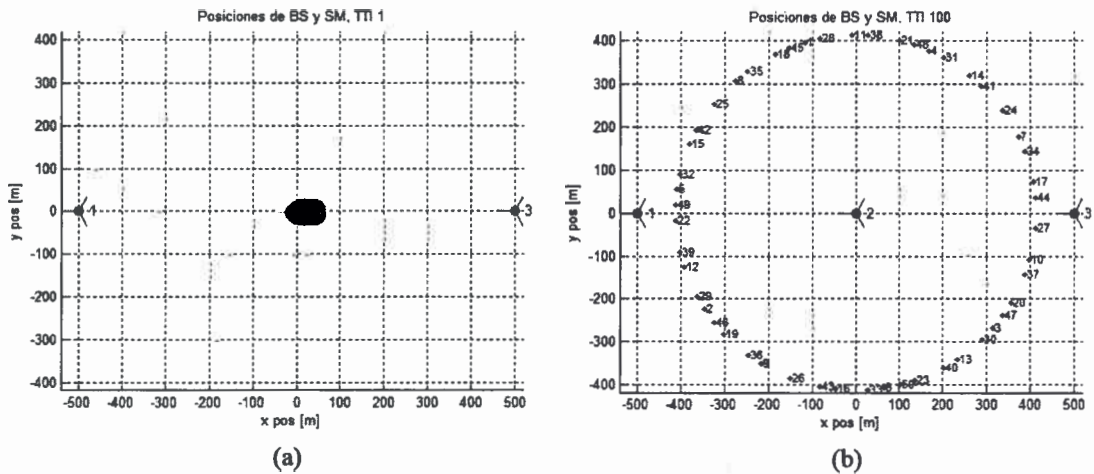


Figura 7.7. Proceso de simulación para el cálculo de capacidad.

Finalizado el barrido, se procede a calcular el *throughput* promedio para cada SM y BS (sector por sector). En la Figura 7.7 puede destacarse fluctuaciones en la capacidad obtenida a lo largo de la simulación de 10 TTIs. Esto se debe principalmente a que los SM se fueron moviendo por todo el plano, experimentando distintas variaciones producidas por el canal, ajustándose continuamente la modulación (utilizando esquemas AMC) alcanzando luego de 0,1[s] un *throughput* promedio cercano a 350kbps para un BLER del 9%, lo que cumple con el requisito fijado en la sección 7.4.1. Esta tasa de transmisión alcanzada es medida en el borde de la celda, por lo que representa la capacidad mínima de un SM en el sistema.

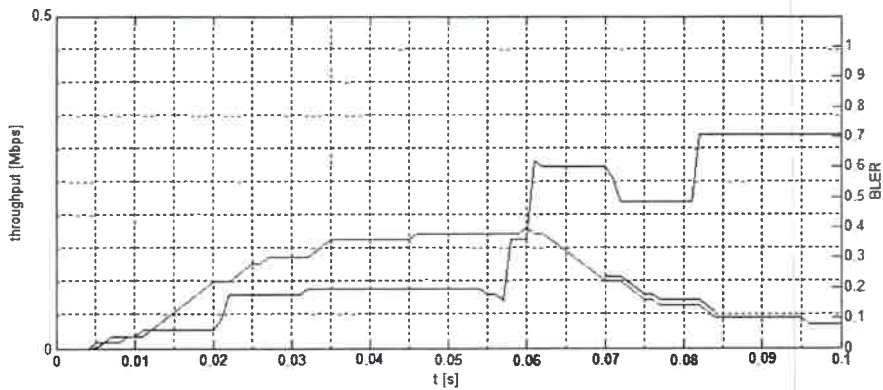


Figura 7.8. *Throughput* promedio alcanzado después de 10 TTIs.

La Figura 7.9 muestra un despliegue de 19 celdas, en donde se han situado de forma aleatoria 570 SM que se atienden en simultáneo.

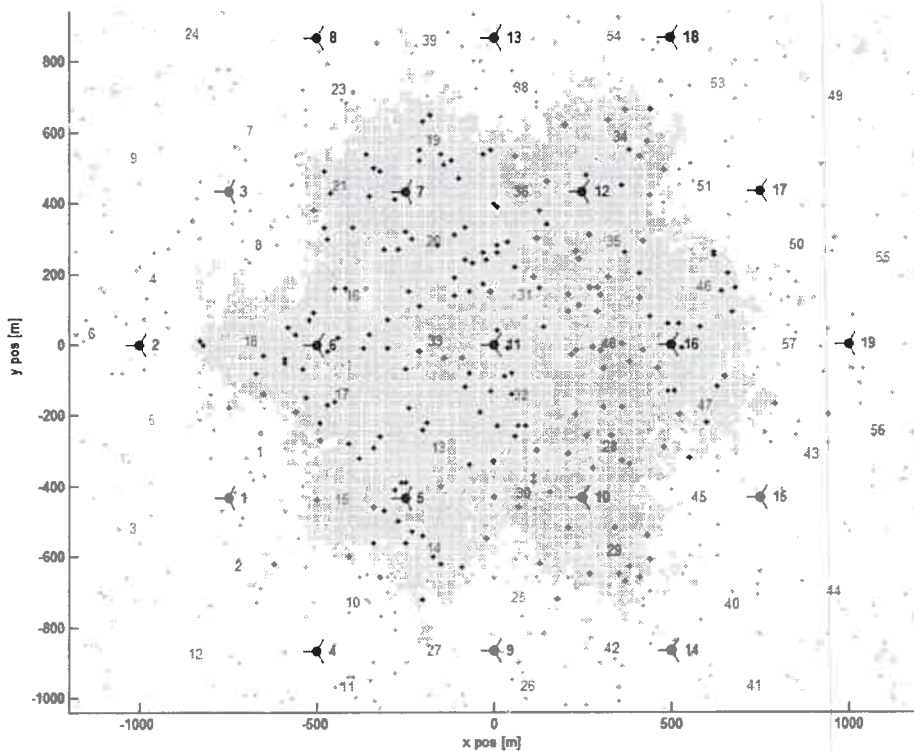


Figura 7.9. Despliegue de 19 celdas.

En este nuevo esquema el *throughput* promedio experimentado por los SM se ilustra en la Figura 7.10.a, en donde se ubican los resultados percibidos en los enlaces ascendentes y descendentes promediados. Empleando una función de distribución acumulada que analice la capacidad de transferencia, tal como se expone en la Figura 7.10.b, se puede apreciar que el *throughput* promedio por SM es 5,82 Mbps (es decir que más de la mitad de los medidores

ubicados exceden este valor). Además un 5% de los dispositivos presentan picos superiores de 10,85 Mbps.

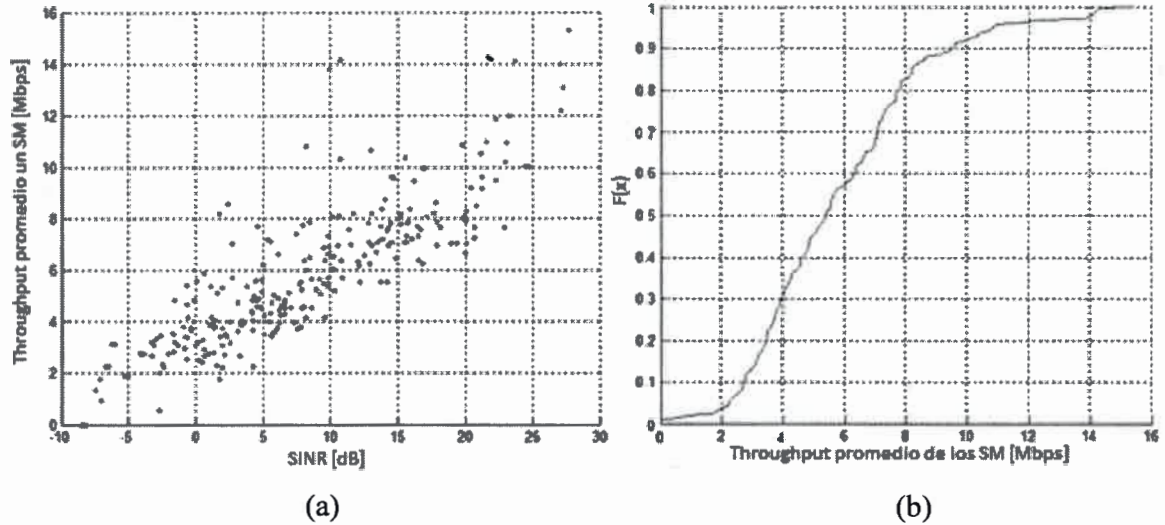


Figura 7.10. *Throughput* promedio experimentado por los SM. (a) *Throughputs* de los SM en función de la SINR. (b) Distribución de probabilidad acumulada de las capacidades obtenidas.

Finalmente, al evaluar el *throughput* promedio que cursa cada BS se obtuvo 58.19 Mbps, con una utilización promedio de los recursos disponibles (RB) del 55.17%, lo que significa que se posee una capacidad sobrante de un 44.83%.

7.6. Latencia del Sistema.

La latencia se define como la suma de retardos temporales desde la transmisión hasta la recepción de uno o varios paquetes que contienen información. En los sistemas inalámbricos este retardo suele ser mucho más significativo que en otro tipo de redes. Además los métodos de duplexación (TDD) y de acceso (TDMA) agravan aún más la situación.

En general, la latencia no es un aspecto crítico para aplicaciones WAMI. Sin embargo el objetivo de esta sección es formular un criterio de diseño sencillo que permita al planificador de la red escoger el tiempo de trama adecuado minimizando la latencia en la comunicación, logrando un sistema más eficiente.

NOTA. Solo se estudian sistemas entramados, y retardo de propagación se asume como despreciable.

El modelo para el análisis de latencia en la WiGRID puede iniciarse mediante un estudio de esquemas de acceso y duplexión temporal (TDMA/TDD). Teniendo en cuenta que el tiempo de trama se reparte de igual manera tanto para el up-link como para el *downlink*, y que el

modelo estocástico que caracteriza los arribos de paquetes a una estación base es un proceso de Poisson,

$$D = \frac{\lambda * T_F}{2 * (1 - \lambda * T_F)} + \frac{T_F}{M} + \frac{T_F}{2} \quad \text{ec. 7.1}$$

En donde “ λ ” es la frecuencia esperada de arribo, “ T_F ” es el tiempo de trama y “ M ” es el número de slots.

Este método asume que todo el tiempo de trama se utiliza para transmitir información directa del usuario, es decir que este estudio no contempla el *overhead* agregado por el protocolo para la gestión de los mensajes y control general del sistema. Esto obliga a realizar otro enfoque, orientado al sistema entramado propio del protocolo, contemplando así las cabeceras previamente mencionadas.

Debido a la naturaleza propia de los sistemas entramados, estos poseen una mejor eficiencia espectral en redes “punto - multi puntos” que los sistemas basados en ráfagas (utilizados, por ejemplo, en IEEE 802.11-WiFi), sin embargo la latencia (que para sistemas entramados se mide como RTT, *round trip time* [92]) suele ser mayor que en estos últimos. Esto ocurre ya que la medir latencia RTT debe emplearse el canal en ambos sentidos (BS a SS y SS a BS), siendo esto imposible de ocurrir en una misma trama. Si se puede resaltar que este tipo de latencia será siempre un múltiplo de la longitud de la trama utilizada. WiMAX puede configurarse para trabajar con tramas de 2.5, 5, 10 y 20 ms.

Por otro lado, medir latencia en un sistema de comunicaciones no es una tarea fácil, principalmente por la dificultad en la sincronización del reloj de los puntos extremos. Para superar esta dificultad la latencia se mide como el tiempo de ida y vuelta de un paquete, dividido por dos, lo que se conoce como “*Round Trip Time*”. El modelo de latencia propuesto se basa en un RTT escalado [92].

Siempre en busca de minimizar el RTT, es lógico pensar, como se presentó en el párrafo anterior, que debería utilizarse tiempos de tramas de corta duración, no obstante esta decisión implicaría dos inconvenientes:

- 1) Una reducción en el *throughput* debido a que las cabeceras de información que se insertan según el estándar son fijas, por lo que cobra mayor peso mientras que se reduce el tiempo para insertar la información recolectada por los dispositivos inteligentes.
- 2) La duración de los tiempos de tramas afecta a la cantidad de usuarios que pueden ser atendidos de forma simultánea.

La Figura 7.11 muestra las latencias obtenidas a medida que crece el número de usuarios en dos tramas distintas, una de corta duración (10ms) y otra de larga duración (20ms). Analizando la gráfica, se pueden apreciar 2 regiones de trabajo distintas:

- De 0 a 50 usuarios, las latencias calculadas son similares tanto para la trama de larga duración como para la de corta. Esta latencia tiene un valor máximo de 60ms.
- De 50 a 100 usuarios puede apreciarse que la latencia de la trama de larga duración no varía mientras que para la trama de corta duración aumenta a 90ms.

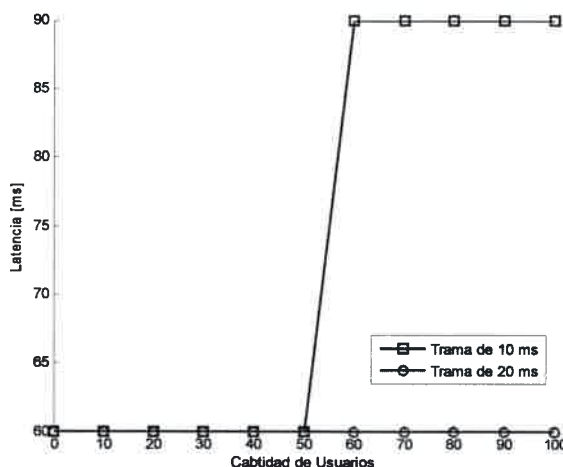


Figura 7.11. Comparación de latencias.

Los resultados obtenidos muestran que trabajar con tramas de larga duración resulta favorable en la reducción de la latencia cuando el sistema debe gestionar un gran número de usuarios simultáneos.

7.7. Planificación de una Smart City utilizando una WiGRID mallada entre las BS.

En este apartado, se pretende exponer los resultados obtenidos al modelar una infraestructura Mesh con un *backhaul* WiMAX para dar soporte de comunicaciones en una *Smart City*. Si bien existen distintas topologías de comunicaciones (nodal, anillo, árbol, etc.) este trabajo se enfoca en redes malladas o auto-expansibles (*Mesh*) debido a las siguientes ventajas:

- Confiabilidad, fácil escalabilidad y mantenimiento.
- Reducción en las potencias de transmisión.
- Son redes de rápido despliegue.
- Funciones *self-healing* y Auto-Configuración

En la Figura 7.12 se puede apreciar una red mallada de tipo Infraestructura / multi-radio, en la cual cada nodo utiliza una interfaz de radio para dar cobertura a los clientes y otra, independiente, como *backhaul* de comunicaciones (flujo de información entre nodos). Como se puede apreciar en la imagen, el mallado se realiza en el *backhaul*, mientras que las

conexiones de los clientes a los nodos poseen una topología sencilla punto-multipunto tipo “Estrella”.

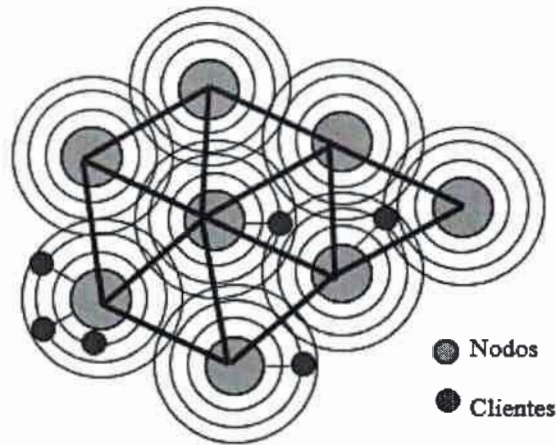


Figura 7.12. Arquitectura de una WMN Multi-Radio.

Para modelar el problema se considera una zona urbanizada con una mediana densidad poblacional. El área geográfica seleccionada está conformada por 9 manzanas tal como se ve en la Figura 7.13.a. Se estima que cada manzana contiene 30 domicilios y 4 edificios. Cada edificio, en promedio, tiene 6 pisos y 4 departamentos por piso. Por medio de estas aproximaciones obtenemos 126 medidores inteligentes por manzana. El área a la que se pretende brindar cobertura consta de 102400m².

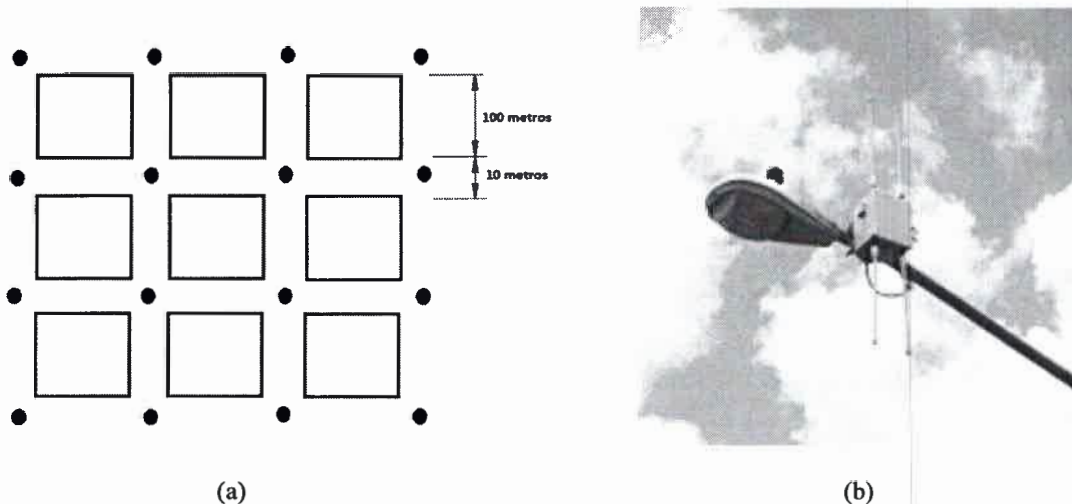


Figura 7.13. Ubicación de los nodos. (a) Modelo geográfico propuesto. (b) Ubicación de los nodos.

La Figura 7.13.a ilustra una distribución hipotética para la ubicación de los nodos. Se supone además que los nodos son instalados a 10 metros por sobre el nivel del suelo. Una opción para esta instalación podría ser sobre los postes de alumbrado público como se muestra en la Figura 7.13.b. Cada nodo posee dos interfaces de radio. La primera interfaz (Radio 0) está

destinada a brindar servicio a usuarios próximos al mismo empleando una tecnología WiMAX con arquitectura punto-multipunto. La segunda interfaz (Radio 1) emplea a WiMAX como *backhaul* de información en una arquitectura mallada entre todos los nodos de la red.

El cálculo que caracteriza a la interfaz “Radio 0” y “Radio 1”, se corresponde numéricamente con todas las simulaciones realizadas en el capítulo VI y VII, con la salvedad de que ahora el radio de cobertura y la cantidad de usuarios a servir se han reducido.

En la Tabla 7.6 se muestran las especificaciones técnicas de cada uno de los nodos que conforman la arquitectura de la red. Además se contemplan consideraciones de desvanecimiento producidas por el canal.

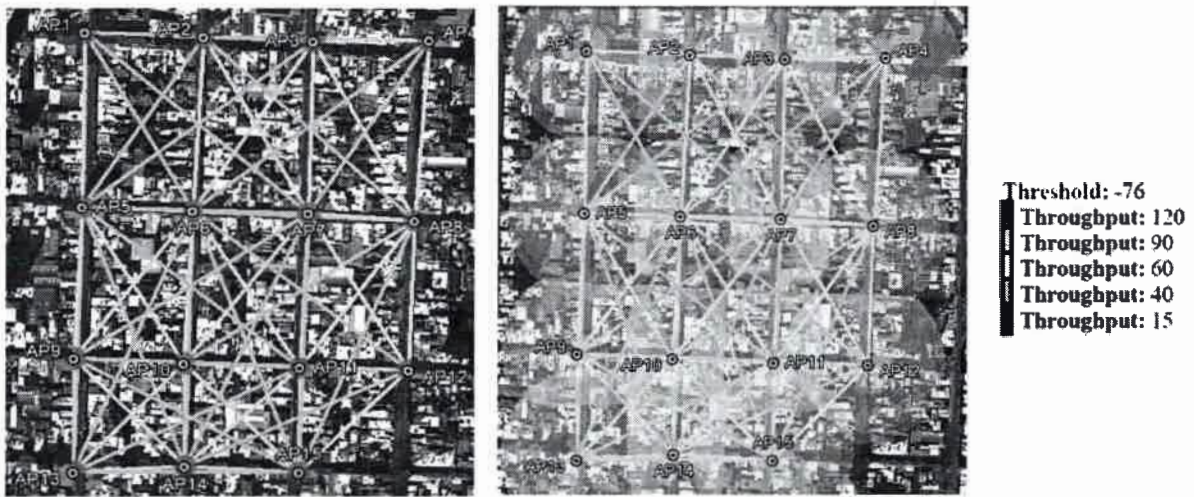
TABLA 7.6. Especificaciones técnicas y consideraciones del canal.

Características	Nodos		Clientes
	Radio 0	Radio 1	
Margen de Fading	12 dB	3 dB	-
Potencia	27 dB	20 dB	15 – 17 dBm
Ganancia de las Antenas	3 dB	3 dB	3 dB
RSL	-75 dBm	-75 dBm	-75 dBm

El margen de fading contemplado en el modelo cumple la función de brindar cobertura frente a las distintas atenuaciones que pueden experimentarse en la comunicación producto del medio de transmisión [100]. Los niveles de sensibilidad de los receptores (RSL) son los que típicamente poseen los equipos comerciales disponibles en el mercado.

Para realizar la simulación se utilizó un software gratuito de la compañía Aruba [102] que trabaja directamente en la “nube” utilizando el potencial de los servidores de dicha compañía. Los resultados de las simulaciones se articularon con el software “*Google Earth*” para poder representar los resultados de una manera más amena.

La Figura 7.14 ilustra los resultados obtenidos. El Access Point 4 (AP4) es el nodo portal, es decir el punto de la red por el cual se terminará en-rutando la información recolectada por los demás nodos hacia el sistema.



(a) Cobertura a 120 Mbps.

(b) Cobertura a 55 Mbps.

Figura 7.12. Backhaul Mesh, con acceso a través del AP4. (a) Cobertura a 120 Mbps. (b) Cobertura a 55 Mbps

Puede apreciarse en la precedente figura que los enlaces poseen un *throughput* que oscila entre 40-90 Mbps (medidos en la capa TCP del modelo OSI).

Luego de analizar los resultados de las simulaciones para diferentes escenarios, se utilizó como criterio de evaluación encontrar los mayores radios de cobertura, con el fin de reducir el número de nodos, sin dejar de garantizar un *throughput* mínimo capaz de soportar una infraestructura AMI y algunos servicios adicionales. Los resultados obtenidos tras esta evaluación se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 7.7 Resultados computados.

Radio de Cobertura [m]	Throughput [Mbps]	Medidores servidos por nodos	Requisito de una AMI [Mbps]	Excedente [Mbps]
69	17,1	252	12,06	5,94

Es importante aclarar que para computar dichos resultados se estimó que cada medidor requiere una tasa 50kbps. El *throughput* que se muestra en la tabla es directamente medido a nivel de Aplicación (capa 7 del modelo OSI). Se remarca la viabilidad de instalar cámaras de video-vigilancia y poder realizar el control de señales de tráfico y paneles de información gracias a que el excedente de capacidad de la red cubre los requisitos de los mismos.

En conclusión se cubrió una superficie urbana de 102400 metros cuadrados en ciudad, con 15 nodos sirviendo 3780 medidores inteligentes.

NOTA. Se observa que las tasas de transferencias obtenidas exceden los valores máximos teóricos que se presentaron en capítulos anteriores para aplicaciones AMI.

7.8. Conclusiones.

Mientras que las simulaciones a nivel de enlace (tratadas en el capítulo anterior) son importantes para desarrollar estructuras receptoras, esquemas de codificación y estrategias de *feedback*; no es posible utilizar este análisis para realizar tareas de planeación de celdas, programación y control de usuarios o estudios de interferencia. Esta es la razón por la que en el modelo de simulación del sistema (WiGRID), se debieron abstraer aspectos relativos a la capa Física, a fin de reducir la complejidad numérica del problema.

En las secciones 7.2 se definió la estructura y configuración del sistema. El apartado 7.3 se mostraron diferentes modelos disponibles para el estudio de sistemas WiMAX, resaltando las carencias que los mismos poseen. En este contexto se presentó una adaptación de un modelo LTE para una WiGRID, flexible y capaz de integrarse con los scripts previamente desarrollados en el capítulo anterior.

La evaluación del sistema se basó en 3 puntos:

1. Estudio de cobertura en canales urbanos.
2. Estudio de capacidad del sistema.
3. Estudio de Latencia del sistema.

Los resultados encontrados demostraron la factibilidad de implementación de una WiGRID.

El potencial de la red de comunicaciones propuesta excede todos los requisitos fijados, dando una flexibilidad al sistema para la incorporación de nuevas aplicaciones. Además, la solución propuesta es escalable, permitiendo rápidos despliegues y/o ampliaciones.

Finalmente, se expuso un trabajo de diseño de una WiGRID Mesh como un complemento del estudio realizado.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y APORTES REALIZADOS.

8.1. Conclusiones.

La migración de la red eléctrica contemporánea hacia la *Smart Grid* constituye una solución versátil y robusta, capaz de afrontar el creciente problema energético actual. Una SG busca mejorar la eficiencia, gestión y control de los recursos disponibles, facilitando la incorporación de nuevas fuentes de energía renovables y fomentando políticas de ahorro por parte de los consumidores.

En este trabajo se ha indicado la importancia de las redes de comunicaciones como soporte para el desarrollo de una SG, proponiendo a WiMAX (tecnología de banda ancha de 4G) como una infraestructura de bajo costo y rápido despliegue.

A continuación se presentan los objetivos alcanzados en cada capítulo.

- Capítulo 1: Se realizó una introducción general al trabajo desarrollado en esta tesis.
- Capítulo 2: Se presentó un estudio sobre la evolución de la red eléctrica, contextualizando de esta forma la problemática actual, y el cambio de paradigma que introduce el concepto de SG. Se identificaron los actores y agentes involucrados, así como los organismos a nivel nacional e internacional que aúnan esfuerzos para la normalización de estándares que faciliten la migración hacia este tipo de redes.
- Capítulo 3: Se describió un modelo conceptual de comunicaciones para una SG, definiendo los requisitos y performances mínimas de las aplicaciones que se utilizarán. Este modelo fue la base para el diseño y evaluación del sistema de comunicaciones implementado.
- Capítulo 4: Se presentó un estudio del estado del arte de todas las tecnologías y protocolos de comunicaciones, que actualmente se utilizan o prevén implementarse en una SG.
- Capítulo 5: Se presentaron a los sistemas inalámbricos como una solución económica, escalable, flexible y confiable para el despliegue de una Infraestructura de medición avanzada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*). Particularmente, se desplegó una solución basada en tecnologías de cuarta generación (4G), conocida como WiMAX, detallando sus principales características. Además se desarrollaron las métricas de evaluación para el sistema y se introdujo el concepto de la WiGRID.
- Capítulos 6 y 7: Se realizó el modelado completo de una WiGRID, para dos diferentes escenarios, desglosando este proceso en dos niveles: *Link-Level Simulation* y *System-Level Simulation*. Mientras que las simulaciones a nivel de enlace son importantes

para desarrollar estructuras receptoras, esquemas de codificación y estrategias de *feedback*; no es posible utilizar este análisis para realizar tareas de planeación de celdas, programación y control de usuarios o estudios de interferencia. Esta es la razón por la que en el modelo de simulación del sistema, se abstraieron aspectos relativos a la capa Física a fin de reducir la complejidad numérica del problema.

El primer escenario analiza una solución para zonas de baja densidad poblacional, en donde solo se necesita instalar una BS para brindar el servicio. En este estudio se desprecia el análisis a nivel de sistema, por ser el mismo trivial (es decir solo se cuenta con una sola estación base). Sin embargo se puso especial énfasis en el modelo de canal utilizado para definir los umbrales de SNR, necesarios en las estructuras AMC. El segundo escenario posee múltiples estaciones suscriptoras y múltiples nodos concentradores, por lo que es necesario modelarlo de forma completa (es decir, a nivel de enlace y sistema). En ambos casos, los resultados encontrados demostraron la factibilidad de implementación de una WiGRID para dar soporte a infraestructuras AMI.

El potencial de la red de comunicaciones propuesta excede todos los requisitos fijados, dando una flexibilidad al sistema para la incorporación de nuevas aplicaciones. Además, la solución propuesta es escalable, permitiendo rápidos despliegues y/o ampliaciones.

8.2. Trabajos Futuros.

El trabajo de maestría deja abiertas diferentes líneas de investigación, específicamente, entre las más importantes pueden citarse,

- Migrar la plataforma de simulación hacia estándares 802.11n y LTE-*Advanced*.
- Confeccionar pruebas y ensayos experimentales que validen los resultados simulados.
- Desarrollar aplicaciones y algoritmos para el control de la demanda, cuyos requisitos de comunicaciones puedan ser satisfechos por el sistema presentado. Algunos recientes trabajos relacionados con este punto se pueden encontrar en [93], [94] y [95].

8.3. Aportes realizados.

Los aportes realizados a partir de publicaciones en congresos que contribuyeron a la realización de la tesis, o que se originaron durante el transcurso de la confección de la misma, se resumen a continuación,

- J.F. Aguirre y F. Magnago, “Viability of WiMax for Smart Grid Distribution Network”. European International Journal in Science and Technology. Vol. 2 N° 3 – page 181-196. April 2013. ISSN: 2304-9693.
- J.F. Aguirre y F. Magnago, “Utilización de redes auto-expansibles para una red inteligente Eléctrica”. ERIAC, Foz de Iguazú, Brasil. Mayo 2013.

- J.F. Aguirre, R. Prat y F. Magnago, "Evaluation of performance of WiMAX networks for Smart Grids". ArgenCON Congress. Argentine Chapter IEEE PES. Cordoba, Argentina (June 13-15, 2012).
- J.F. Aguirre and E. Tardivo, N. Veglia, "Diseño de arreglo de antenas por síntesis de Fourier aplicado en Smart Grid", "14° Argentine Symposium on Technology" AST2013. Córdoba, Argentina. Sep. 2013.

Como complemento y experiencia práctica de la tesis, se realizó un trabajo de automatización y conectividad inalámbrica para las subestaciones eléctricas de la universidad, para poder tomar mediciones y optimizar el consumo. El trabajo abarcó un diseño completo del sistema de comunicaciones, implementando pasarelas de conversión de protocolos RS485 a Ethernet, Ethernet a 802.11g. Además se desarrolló un sistema SCADA programado en Visual C# para su administración.

REFERENCIAS

- [1] ADEERA. "Asociación de Distribuidores de Energía Eléctrica de la República Argentina," Consulta realizada en Junio 2012. <http://www.adeera.org.ar/edicionesant.asp>
- [2] E. Santacana, G. Rackliffe, T. Le y F. Xiaoming, "Getting Smart," Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 8, no. 2, pp. 41-48, 2010.
- [3] A. P. Johnson, "The history of the Smart Grid evolution at Southern California Edison," Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010, pp. 1-3.
- [4] L. Jingjing, X. Da y A. Qian, "Research on smart grid in China," Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009, 2009, pp. 1-4.
- [5] R. Prat, F. Magnago y J. Amatti, "Sistemas de Comunicación Adecuados para Redes Inteligentes bajo la Norma IEC61850," ERIAC XIV, 2011
- [6] TheCapitol.Net, "Smart Grid", 2009, Alexandria, UA. ISBN: 158733-162-4.
- [7] Department of Energy, USA, "Communications Requirements of Smart Grid Technologies", October 5, 2010.
- [8] IEEE Std. 1646 "Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation", 2004.
- [9] El Brak, M.; Essaaidi, M., "Wireless sensor network in smart grid technology: Challenges and opportunities," Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), 2012 6th International Conference on , vol., no., pp.578,583, 21-24 Mar. 2012.
- [10] U.S. Department of Energy & Litos Strategic Communication, The Smart Grid: An Introduction, Octubre 2008.
- [11] Kristina Hamachi, LaCommare and Joseph H. Eto, "Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers", Berkley National Laboratory, Sept. 2004. LBNL-55718.
- [12] European Commission. "Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system". Consulta realizada en Julio 2011. http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en.htm
- [13] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai y V. Terzija, Measurements Get Together, IEEE Power & Energy Magazine: "Smart Grid... Putting it All Together", págs. 15-23, Enero 2009.

- [14] Electric Power Research Institute EPRI. “*Report to NIST on the Smart Grid interoperability standards roadmap*” (Contract No.SB1341-09-CN-0031—Deliverable 7). Jun. 2009. Consulta realizada en Julio 2011.
<http://www.nist.gov/smartgrid/upload/InterimSmartGridRoadmapNISTRestructure.pdf>
- [15] NISTIR 7628 “*Guidelines for Smart Smart Grid Grid Cyber Security Security*”, Junio 2011. Consulta realizada en Agosto 2012. http://www.nist.gov/smartgrid/upload/nistir-7628_total.pdf
- [16] NISTIR 7823 “*Advanced Metering Infrastructure – Smart Meter Upgradeability Test Framenwork*”, Julio 2012. Consulta realizada en Octubre 2012.
http://csrc.nist.gov/publications/drafts/nistir-7823/draft_nistir-7823.pdf
- [17] IEC “*Smart Grid Standarization Roadmap*”.Consulta realizada en Noviembre 2012.
http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf
- [18] IEC “*Standards*”. Consulta realizada en Noviembre 2012.
<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>
- [19] IEEE “*Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads*”. Consulta realizada en Diciembre 2012.
http://grouper.ieee.org/groups/scc21/2030/2030_index.html
- [20] AEA. "Asociación Electrotécnica Argentina". Consulta realizada en Junio 2012.
<http://aea.org.ar>
- [21] IRAM. “*Instituto Argentino de Normalización y Certificación*”. Consulta realizada en Junio 2012.<http://www.iramcoleccion.org.ar/>
- [22] Sonoma Innovation. (2009a). “*Smart Grid communications architectural framework Smart Grid interoperability standards IP protocol & wireless/AMP*”.Consulta realizada en Abril 2011. <http://www-users.cselabs.umn.edu/classes/Fall-2009/seng5861/project/a1ueNt4L.pdf>
- [23] Sonoma Innovation. (2009b). “*Smart Grid communications logical reference architecture*”.Consulta realizada en Abril 2011. <https://mentor.ieee.org/2030/dcn/09/2030-09-0110-00-0011-smart-grid-communications-logical-reference-architecture.ppt>
- [24] The GridWise Architecture Council. “*The GridWise® interoperability context-setting framework*”.Marzo, 2008.
- [25] De Craemer, K. & Deconinck, G. (2010, Marzo).“*Analysis of state of the art smart metering communication standards*”. Youngs Researchers Symposium, Leuven, Bélgica. 2010.

- [26] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke, "Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, Oct. 2010.
- [27] Kwok-Hong Mak and Barry Holland, "Migrating Electrical Power Network SCADA systems to TCP/IP and Ethernet Networking", *IEEE Trans. Power Engineering Journal* Dec, 2002.
- [28] Wenpeng Luan; Sharp, D. and Lancashire, S., "Smart grid communication network capacity planning for power utilities," *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES* , vol., no., pp.1,4, 19-22 April 2010.
- [29] Kim, Jaebeom; Kim, Dabin; Lim, Keun-Woo; Ko, Young-Bae; Lee, Sang-Youm, "Improving the reliability of IEEE 802.11s based wireless mesh networks for smart grid systems," *Communications and Networks, Journal of* , vol.14, no.6, pp.629,639, Dec. 2012.
- [30] Niyato, D.; Ping Wang, "Cooperative transmission for meter data collection in smart grid," *Communications Magazine, IEEE* , vol.50, no.4, pp.90,97, April 2012.
- [31] Minciardi, R.; Sacile, R., "Optimal Control in a Cooperative Network of Smart Power Grids," *Systems Journal, IEEE* , vol.6, no.1, pp.126,133, March 2012.
- [32] Daniel Martínez Santiago, "Determinación del Efecto Corona en el Ramal de una Red de Distribución". D.F. Mexico. Nov. 2010.
- [33] V. C. Gungor and F. C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," *Comput. Networks*, vol. 50, pp. 877–897, May 2006.
- [34] Y. Peizhong, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 110–120, Mar. 2011.
- [35] B. Lu and V. C. Gungor, "Online and remote energy monitoring and fault diagnostics for industrial motor systems using wireless sensor networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, Nov. 2009.
- [36] C. Gezer and C. Buratti, "A ZigBee smart energy implementation for energy efficient buildings," in *Proc. IEEE 73rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, pp. 1–5, May 2011.
- [37] R. P. Lewis, P. Iqic, and Z. Zhongfu, "Assessment of communication methods for smart electricity metering in the U.K.," in *Proc. IEEE PES/IAS Conf. Sustainable Alternative Energy (SAE)*, pp. 1–4, Sep. 2009.
- [38] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, and S. Ergüt, "Smart grid communications and networking," *Türk Telekom, Tech. Rep. 11316-01*, Apr. 2011.

- [39] D. M. Lavery, D. J. Morrow, R. Best, and P. A. Crossley, "Telecommunications for smart grid: Backhaul solutions for the distribution network," in Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Jul. 25–29, 2010, pp. 1–6.
- [40] S. Goldfisher and S. J. Tanabe, "IEEE 1901 access system: An overview of its uniqueness and motivation," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 10, pp. 150–157, Oct. 2010.
- [41] Rodrigo Prat, "Protocolos de comunicaciones orientados a sistemas de Gestión de Energía", Tesis de Maestría, Fac. de Ingeniería, U.N.R.C. Córdoba, Argentina. Año 2012.
- [42] IEEE Std 802.16e-2009, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems.
- [43] CIO-Spain, "WiMAX vs LTE". Consultado en Septiembre 2012:
<http://www.ciospain.es/archive/wimax-y-lte-en-guerra-por-el-dominio-de-la-cuarta-generacion-movil>
- [44] Wang, Mingxi, "WiMAX physical layer: Specifications overview and performance evaluation," Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE , vol., no., pp.10,12, 9-12 Jan. 2011.
- [45] Lukasz Chrost, Agnieszka Brachman, Towards a common benchmark in WiMAX environment, Computer Communications, Volume 33, Supplement 1, 15 November 2010, Pages S78-S85, ISSN 0140-3664.
- [46] Yue-Ru Chuang; Hsueh-Wen Tseng; Shiann-Tsong Sheu; Chih-Wei Su, "An Almost Overhead-Free Error Control Scheme for IEEE 802.16-Based Multi-hop Networks," Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009.IEEE , vol., no., pp.1,6, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009.
- [47] Singh, A.K.; Srivastava, N.; Garg, A.; Gupta, A.D., "A WiMAX segmentation for 3rd generation N/W simulator," Computer and Communication Technology (ICCCT), 2010 International Conference on , vol., no., pp.135,140, 17-19 Sept. 2010.
- [48] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed. "Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking". Editorial Prentice Hall. Mar. 2007. ISBN10: 0-13-222552-2.
- [49] Andreas Deininger, Shinsaku Kiyomoto, Jun Kurihara, Toshiaki Tanaka, "Security Vulnerabilities and Solutions in Mobile WiMAX", International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.11, Nov. 2007.
- [50] Karen Scarfone, Cyrus Tibbs and Mathew Sexton, "Guide to Securing WiMAX Wireless Communications", NIST Special Publication 800-127. Sept. 2010.

- [51] Ignacio Catrileo D., Ignacio García A. and Agustín González V., “Protocolo ARQ-Híbrido”. Universidad Tecnica Federico Santa María. Chile. 2009.
- [52] Xu Shun; Feng Wang, “Performance Research of MIMO System Based on Alamouti Space-Time Coding,” Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 International Conference on , vol., no., pp.966,969, 7-9 Dec. 2012
- [53] “System Profile Requirements for Smart Grid Applications”. WiMAX Forum. Feb. 2013.
- [54] IEEE Std 802.16m, Amendment to IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems – Advanced Air Interface.
- [55] IEEE Std 802.16n, Higher Reliability Networks.
- [56] IEEE Std 802.16p, Enhancements to Support Machine-to-Machine Applications.
- [57]Kyushu Electric Power Company. <http://www.kyuden.co.jp>
- [58]Center Point Energy, Houston, Texas. <http://www.centerpointenergy.com/>
- [59] Alvarion. <http://www.alvarion.com/es/>
- [60] “Alvarion Chosen to Deploy Smart City Solution in Mar del Plata, Argentina for Better Governance, Efficiency of Services and Quality of Life”. Yahoo Finance. Feb. 2013. Disponible en: <http://finance.yahoo.com/news/alvarion-chosen-deploy-smart-city-070000786.html>
- [61]Day, J.D.; Zimmermann, H., “The OSI reference model,” Proceedings of the IEEE , vol.71, no.12, pp.1334,1340, Dec. 1983.
- [62] Parikh, P.P.; Kanabar, M.G.; Sidhu, T.S, “Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications”, IEEE PES General Meeting, 2010 IEEE, 25-29 July 2010, MN, USA.
- [63] Zhou Wen-an; Bing Xie; Song Jun-de, “Link-level Simulation and Performance Estimation of WiMAX IEEE802.16e,” Pervasive Computing and Applications. ICPCA 2nd International Conference on , vol., no., pp.667,671, 26-27 Jul 2007.
- [64] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, “Channel Models for Fixed Wireless Applications”, Jun. 2003. Disponible en: [http:// http://ieee802.org/16](http://http://ieee802.org/16)
- [65] WiMAX Forum™, “Mobile System Profile, Release 1.0 Approved Specification”. Revision 1.2.2. Nov. 2006.

- [66] Rengaraju, Perumalraja; Lung, Chung-Horng; Srinivasan, Anand; "Communication requirements and analysis of distribution networks using WiMAX technology for smart grids," 8thInternational , Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), vol., no., pp.666-670, 27-31 Aug. 2012.
- [67] N. Cardona, J. Olmos, M. García, J. Monserrat, "3GPP LTE: HACIA LA 4G MOVIL", Editorial MARCOMBO, S.A. ISBN: 9788426717108. Año 2011.
- [68] Oleksandr Puchko, Vitaliy Tykhomyrov and Henrik Martikainen, "Link Adaptation Thresholds for the IEEE 802.16 Base Station", Telecommunication laboratory, MIT department, Finland.
- [69] Li Chen; Wenwen Chen; Bin Wang; Xin Zhang; Hongyang Chen; Dacheng Yang, "System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems," Communications Magazine, IEEE , vol.49, no.7, pp.148,155, July 2011.
- [70] Jiaii Zhang; Yu Zhao; Jian Li; Jian Zhang; Xiaodong Zhang, "Design and Implementation of a Distributed System Level Evaluation Platform for Mobile WiMAX," Communications and Networking in China, 2007. CHINACOM '07. Second International Conference on , vol., no., pp.23,27, 22-24 Aug. 2007.
- [71] Byoung Jun Lee; Jin-Woo Kim; Kim, B.C.; Kim, J.C.; Kang, C.G., "System-Level Performance of MIMO-based Mobile WiMAX System," Mobile WiMAX Symposium, 2009. MWS '09. IEEE , vol., no., pp.189,194, 9-10 July 2009.
- [72] Jain, R.; Chakchai So-In; Al Tamimi, A.-k., "System-level modeling of IEEE 802.16E mobile wimax networks: Key issues," Wireless Communications, IEEE , vol.15, no.5, pp.73,79, October 2008.
- [73] Dr. Shyam Parekh, sparekh@Alcatel-Lucent.com. Consultado en mayo 2012: <http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/wimax/>
- [74] Dr. Jenhui Chen, The Wireless Intelligence Networks (WIN) Laboratory. Consultado en Febrero 2013: <http://www.csie.cgu.edu.tw/~jhchen/>
- [75] NIST IEEE 802.16 NS2 Simulator. Consultado en Diciembre 2012: <http://w3.antd.nist.gov/seamlessandsecure/files/80216/doc/INSTALL.TXT>
- [76] Muhammad Nadeem Khan, "WiMAX 802.16e PHY and MAC", Mathworks, MATLAB Central File exchange: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21039-wimax-802-16e-phy-and-mac-beta>
- [77] Yuanye Wang, "OFDM-based Wireless BroadBand System Simulator". Mathworks, MATLAB Central File exchange:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16591-ofdm-based-wireless-broadband-system-simulator>

[78] Altera, “Scalable OFDMA Engine for Mobile WiMAX (MATLAB based Model)”. Disponible en: <http://www.altera.com/literature/an/an412.pdf>

[79] Cambridge Consultants, “MATLAB-based WiMAX OFDM256 PHY reference design”. Disponible en: http://www.cambridgeconsultants.com/prop_ws_index.shtml

[80] Xilinx, “WiMAX OFDM Library Reference Design”. Disponible en: <http://www.altera.com/literature/an/an412.pdf>

[81] J. Colom, “Vienna LTE Simulators, System Level Simulator Documentation, v1.7r1119”, Vienna University of Technology, Austria.

[82] Jeanette Wannstrom, “LTE-Advanced”, 3GPP. May 2012.

[83] “WiMAX System Evaluation Methodology”, Version 2.1, WiMAX Forum. Jul. 2008.

[84] C. Mehlh'uhner, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, “Simulating the long term evolution physical layer,” in Proc. Of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland, Aug. 2009.

[85] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 48, pp.1277–1294, 2002.

[86] Technical Specification Group Radio Access Network, “Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); LTE radio frequency (RF) system scenarios,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TS 36.942, 2008-2009.

[87] “Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TS 25.814, 2006.

[88] “Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000,” Tech. Rep., 1997.

[89] T. B. Sorensen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, “Extension of the ITU channel models for wideband (ofdm) systems,” in Proc. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005.

[90] S. Mumtaz, A. Gamberio and K. Saidul, “Enhanced algorithm for WIMAX: MIESM”, University of Aveiro, Portugal. 2009

[91] M. of WINNER, “Assessment of advanced beamforming and MIMO technologies,” WINNER, Tech. Rep. IST-2003-507581, 2005.

- [92] Hafiz Md. Rahman, "Modeling and Simulation of Interdependencies between the Communication and Information Technologies Infrastructure and other critical infrastructures", Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Sep. 2009.
- [93] Ozturk, Y.; Senthilkumar, D.; Kumar, S.; Lee, G., "An Intelligent Home Energy Management System to Improve Demand Response," Smart Grid, IEEE Transactions on , vol.4, no.2, pp.694,701, June 2013.
- [94] Jinsung Byun; Insung Hong; Sehyun Park, "Intelligent cloud home energy management system using household appliance priority based scheduling based on prediction of renewable energy capability," Consumer Electronics, IEEE Transactions on , vol.58, no.4, pp.1194,1201, November 2012.
- [95] Abaalkhail, R.; Orozco, M.; El-Saddik, A., "Home Energy saving for Heating/cooling system by distributed intelligent energy controller," Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International , vol., no., pp.604,609, 13-16 May 2012.
- [96] Choi, Gyeong Ho; Park, Sam, "Developing a new course on energy storage systems: Introducing energy challenges for next-generation engineers," Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., pp.354,357, 26-29 Aug. 2013.
- [97] Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. "European Smart Grids Technology Platform - Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the future". 2006. Disponible en: <http://ec.europa.eu/>
- [98] Vincenzo Giordano, Flavia Gangale, Gianluca Fulli, Manuel Sánchez Jiménez. "Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments". JRC REFERENCE REPORTS. Disponible en: <http://ses.jrc.ec.europa.eu>
- [99] KrebsOnSecurity. "FBI Smart Meter Hacks Likely to Spread", Apr. 2012. Disponible: <http://krebsonsecurity.com/2012/04/fbi-smart-meter-hacks-likely-to-spread/>
- [100] Otung, I.E.; Enoch, S., "Mitigation of rain attenuation in fixed WiMAX using cell site diversity," Electronics Letters, vol.47, no.5, pp.349, 351, March 3 201.
- [101] Claude E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 2, Feb. 1998.
- [102] Aruba Networks inc., "Aruba Outdoor RF Planner", Disponible en: <http://www.arubanetworks.com/products/mesh-routers/aruba-3d-outdoor-rf-planner/>

ANEXO

MODELADO DE CANALES INALÁMBRICOS.

Como se explicó en el capítulo anterior, las comunicaciones inalámbricas son una alternativa muy interesante para el despliegue de una red de datos en el dominio de Distribución. Sin embargo el mayor desafío para alcanzar esta meta radica en el correcto modelado del canal de transmisión. En una transmisión inalámbrica los niveles de cobertura así como las tasas de transmisión dependen fuertemente de las condiciones de propagación que existan:

- Con línea de Vista (LOS, Line of Sight)
- Sin línea de Vista (NLOS, Non Line of Sight)

Estas condiciones están sujetas al entorno en el que se realizan las comunicaciones, por ejemplo las zonas densamente urbanizadas suelen ser entornos NLOS.

Este capítulo intenta proveer al lector conceptos y herramientas matemáticas básicas para el modelado de canales inalámbricos, focalizándose luego en los modelos aplicados a tecnologías de comunicaciones de 4ta generación.

Propagación Multi-Camino

Estudiar y comprender el canal de comunicación, así como modelar los mecanismos de propagación del mismo, constituye el principal desafío que debe afrontar todo ingeniero en Telecomunicaciones.

Una correcta, aunque compleja, manera de estudiar el comportamiento de un canal inalámbrico es utilizar los conceptos de electromagnetismo y propagación de ondas. Las ondas electromagnéticas pueden propagarse siguiendo diferentes mecanismos:

- Propagación en el espacio libre
- Reflexión y transmisión
- Difracción
- Scattering

Estos métodos han sido ampliamente estudiados durante los últimos 50 años y en la mayoría de los casos los estudios suponen condiciones ideales y canales inalámbricos con perfecta línea de vista (LOS, *Line of Sight*) entre las antenas transmisoras y receptoras. Sin embargo el comportamiento de estos mecanismos se ve afectado cuando el entorno se convierte en uno sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line of Sight*) dando paso a efectos conocidos como propagación multi-camino.

En la propagación multi-camino las señales transmitidas no alcanzan a la antena receptora directamente debido a los obstáculos que se interponen entre ambos extremos. Las ondas recibidas son una superposición de ondas que llegan desde diferentes direcciones debido a procesos de reflexión, difracción y *scattering* causados por automóviles, edificios, etc... Entonces podemos decir que la señal recibida queda conformada por una suma de replicas de la señal original atenuadas, retardadas y desfasadas. Estas señales por lo general tienen un efecto destructivo, reduciendo el nivel de energía de la señal transmitida. Este fenómeno se lo conoce como desvanecimiento (*fading*) de la señal.

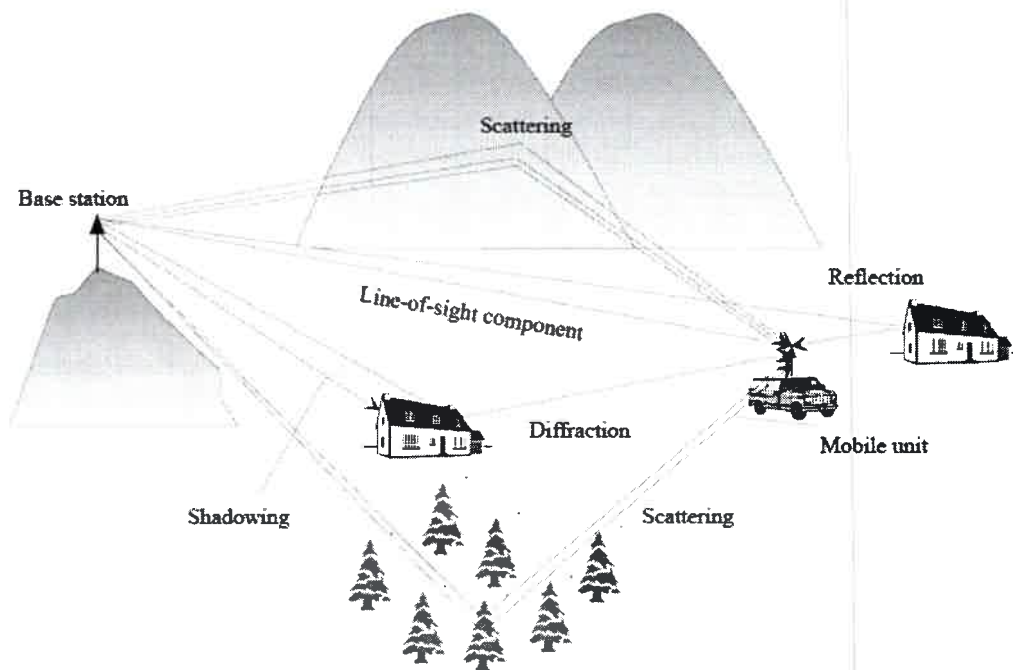


Figura A.1. Propagación Multi-Camino.

Todo canal inalámbrico puede ser perfectamente caracterizado utilizando su respuesta impulsiva $h(\tau, t)$ o su respuesta en frecuencia $H(f, t)$, la cual es la transformada de Fourier de $h(\tau, t)$. La respuesta impulsiva del canal representa el comportamiento del canal en un tiempo t , frente a un impulso aplicado en $t-\tau$.

En ambientes con propagación por multi-camino, la respuesta al impulso del canal que recibe la estación receptora, se compone de un gran número de impulsos diseminados en N_p caminos diferentes:

$$h(\tau, t) = \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j(2\pi f D_p t + \varphi_p)} \delta(\tau - \tau_p), \quad \text{ec. A.1}$$

con,

$$\delta(\tau - \tau_p) = \begin{cases} 1 & \tau = \tau_p \\ 0 & \text{ol} \end{cases}$$

En donde a_p representa la atenuación, f_D frecuencia de Doppler (depende de la velocidad relativa entre el transmisor y el receptor), φ_p representa al desfase de la señal y τ_p el retardo temporal del camino (p va desde 0 hasta N_p-1). Por otro lado definimos a la respuesta en frecuencia como:

$$H(f, t) = \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j(2\pi(f_{D,p}t - f\tau_p) + \varphi_p)} \quad \text{ec. A.2}$$

En la Figura A.2 se ilustra tanto la respuesta impulsiva como la respuesta en frecuencia del canal.

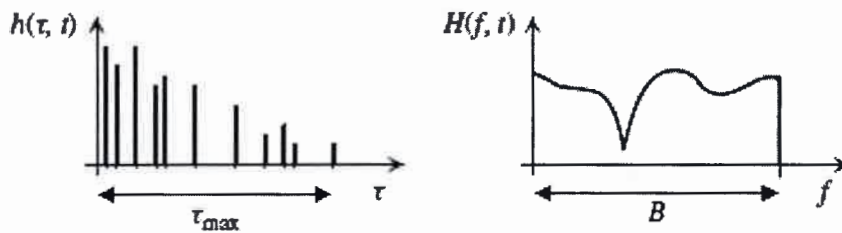


Figura A.2. Respuesta impulsiva vs la respuesta en Frecuencia del canal

Consideramos al τ_{\max} como el máximo retardo (perteneciente al camino N_p) significativo que llega al receptor. Este parámetro se lo conoce como “*delay spread*” del canal y es uno de los requisitos necesarios para modelar y diseñar un sistema de comunicaciones, ya que es el principal causante de fenómenos de interferencia inter símbolo en el medio.

Antes de continuar definiremos el concepto del efecto Doppler, como el aparente cambio de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador.

Esta diferencia de frecuencia podemos modelarla de la siguiente manera:

$$f_{D,p} = \frac{vf_c \cos(\alpha_p)}{c} \quad \text{ec.A.3}$$

Se puede apreciar que esta ecuación depende de la velocidad relativa que existe entre el receptor y el transmisor, así como de la velocidad de propagación en el medio (en este caso es la velocidad de la luz) y la frecuencia de portadora. En este caso “p” representa el camino particular de propagación que se está analizando.

Modelo del Canal en Banda Base

En la mayoría de las aplicaciones inalámbricas, el análisis ocurre en la banda de paso $[f_c - W/2, f_c + W/2]$. Sin embargo, la mayoría del proceso, como lo son la codificación/decodificación, modulación/demodulación, sincronización, etc..., se realizan en banda base. Por lo tanto, desde un punto de vista de diseño y análisis de comunicaciones es más útil disponer de una representación en banda base equivalente.

La Figura A.3 representa un sistema de comunicación básico con modulación/demodulación en cuadratura.

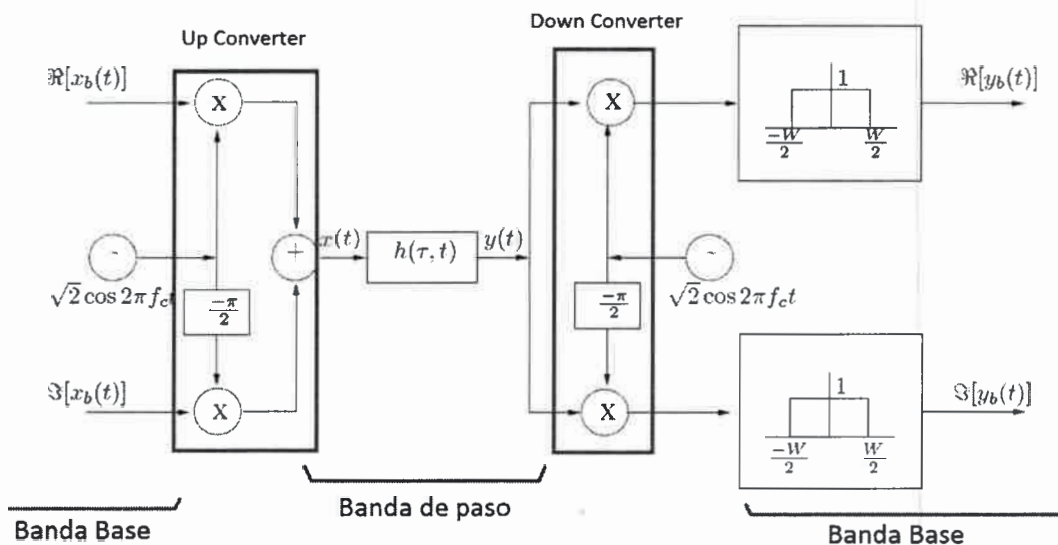


Figura A.3. Sistema de comunicación básico.

Para proceder con el análisis se debe discretizar el modelo de canal. Para ello se usa el enfoque habitual, sirviéndose del teorema de muestreo. Asumiendo que la entrada $x(t)$ es de banda limitada con un ancho W . Por lo que el modelo equivalente está acotado a $W/2$ y se puede representar como:

Señal de entrada,

$$x_b(t) = \sum_n x[n] \text{sinc}(Wt - n) \quad \text{ec.A.4}$$

con el siguiente muestreo,

$$x[n] = x_b(n/W)$$

$$\text{sinc}(Wt - n) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$$

Señal de salida,

$$y_b(t) = \sum_n x[n] \sum_i a_i^b(t) \text{sinc}(Wt - W\tau_i - n)$$

ec.A.5

Por lo que la salida muestreada la podremos representar como una proyección de $y_b(t)$ en la forma de onda $W\text{sinc}(Wt-m)$.

$$y[m] = \sum_l x[m-l] \sum_i a_i^b(m/W) \text{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$

ec.A.6

con,

$$l = m - n$$

definiendo a

$$h_l[m] = \sum_i a_i^b(m/W) \text{sinc}[l - W\tau_i(m/W)W]$$

ec.A.7

entonces,

$$y[m] = \sum_l h_l[m] x[m-l]$$

ec.A.8

Es muy importante destacar que el valor de cada coeficiente de “h” es función de las ganancias $a_i^b(t)$ de cada camino perteneciente al intervalo de τ_{\max} , o dicho de otra forma, de cada camino cuyos retardos estén cercanos a l/W . En la Figura A.4 se puede apreciar cómo es realizado este proceso.

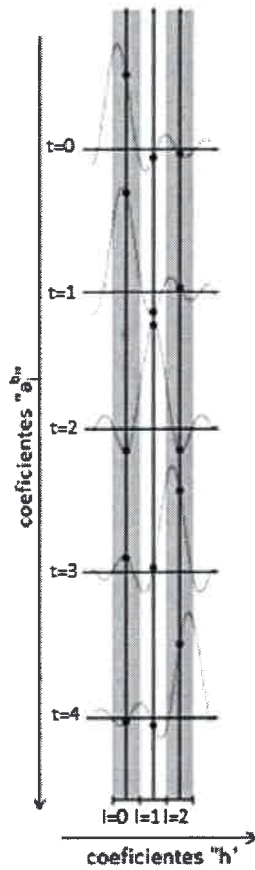


Figura A.4. Representación del cálculo de coeficientes.

Debido al efecto Doppler, el ancho de banda de la salida $y_b(t)$ es generalmente un poco mayor que el de la entrada $x_b(t)$, por lo que la salida muestreada $y[m]$ no representa completamente a la señal transmitida. Sin embargo este problema puede ser obviado en la práctica ya que los valores del ensanchamiento que realiza el Doppler en la señal suele ser entre 10-150 Hz lo cual es muy pequeño comparado con el ancho de banda de la señal.

Tiempo de Coherencia

Conocer la variación del canal en el transcurso del tiempo permite conocer cuán rápido varían los coeficientes $h[m]$. Remitiéndonos a la ecuación "7", sabemos que las variaciones en los coeficientes a_i^b presentan diferencias significativas en períodos que exceden a un segundo. Por otro lado los cambios de fase de cada camino ocurren a intervalos de $1/(4D_s)$, en donde $D_s = f_{D,p}$ representa el desplazamiento debido al Doppler presentado en las ecuaciones A.3 y A.7. Cuando existan diferentes caminos con diferentes velocidades, el criterio de selección será:

$$D_s := \max_{i,j} f_c |\tau_i'(t) - \tau_j'(t)| \quad \text{ec.A.9}$$

Definimos como tiempo de coherencia (T_c) de un canal inalámbrico al intervalo en el cual $h[m]$ no cambia significativamente en función de “ m ”. Este intervalo temporal ya fue definido como:

$$T_c = \frac{1}{4D_s} \quad \text{ec.A.10}$$

La bibliografía referida a comunicaciones inalámbricas, suele a menudo categorizar a los canales como de desvanecimiento rápido (*fast fading*) o lento (*slow fading*), sin embargo no existe un consenso general acerca de estas diferencias. En este trabajo llamaremos canales de “*fast fading*” si el tiempo de coherencia, T_c , es mucho menor que el tiempo del símbolo (T_s) de información que se desea transmitir, mientras que si T_c es mayor que T_s diremos que estamos frente a un canal de “*slow fading*”.

Caracterizar a un canal siguiendo este criterio permite optimizar el diseño de los equipos y por ende de la comunicación obteniendo el tiempo máximo de tolerancia para re-estimar el canal.

Delay spread y ancho de banda de coherencia.

Otro parámetro importante para caracterizar sistemas inalámbricos es el “*delay spread*” (T_d), definido como la diferencia en el tiempo de propagación entre el primer camino recibido y el último significativo (siempre medidos en magnitud). Esto ya fue definido en el apartado A.2 como τ_{\max} . Ver Figura A.2.

Esta dispersión en el tiempo que sufre el canal debido al efecto del multi-camino determina la coherencia en frecuencia que el mismo posee. Como ya se analizó los canales inalámbricos cambian en tiempo, pero también lo hacen en frecuencia. Mientras que el parámetro T_c refleja cuán rápido cambia el canal en el tiempo, W_c (Ancho de banda de coherencia) señala la variación que el mismo sufre en el dominio de la frecuencia.

Recordando como definimos a la respuesta en frecuencia de un canal “ h ”:

$$H(f; t) = \sum_i a_i(t) e^{-j2\pi f \tau_i(t)} \quad \text{ec.A.11}$$

La contribución dada por un camino en particular posee una fase lineal en f . Sin embargo, para múltiples caminos existe una fase diferencial dada por $2\pi f(\tau_i(t) - \tau_k(t))$. Es esta fase diferencial la que causa un fading selectivo en frecuencia. Esto significa que la señal no solo cambia significativamente cuando “ t ” varía en múltiplos de $1/(4D_s)$, sino que también cambia cuando el ancho de banda de la señal transmitida es superior a $1/(2T_d)$. Entonces definiremos al ancho de banda de coherencia como:

$$W_c = \frac{1}{2T_d} \text{ ec.A.12}$$

Cuando el ancho de banda de la señal es muy inferior al W_c , podemos decir que el canal se comportará con un desvanecimiento plano (*flat fading*). Es importante remarcar que tanto el *fading* selectivo como el fading plano no son una propiedad única del canal, sino que dependen de la relación que existe entre el T_s y el T_d . En la Figura A.5 se presentan estos dos casos. En esta ilustración f_0 representa el ancho de banda de coherencia del canal, mientras que W ancho de banda de la señal transmitida.

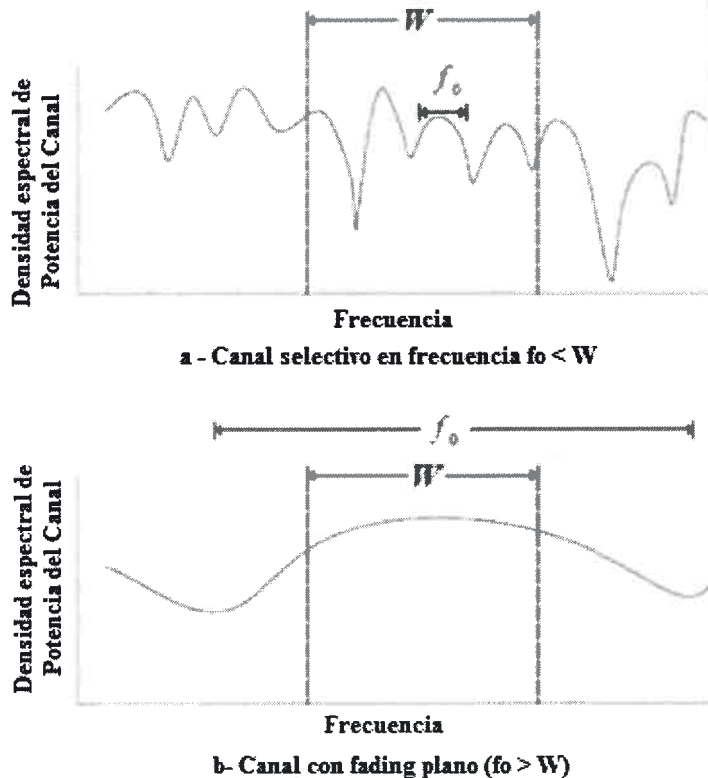


Figura A.5. Fading Selectivo y Plano.

Clasificación de canales.

En las secciones A.4 y A.5 se presentaron las dos propiedades fundamentales que caracterizan a un canal. El tiempo de coherencia determina cuán rápido varía el canal en el tiempo, esto nos permite poder identificar dos diferentes tipos de desvanecimientos:

- *Fast Fading*: el canal cambia su comportamiento ($h(t)$) rápidamente. Esto significa que el tiempo de cambio es menor o del orden que el tiempo del símbolo transmitido (T_s).

- *Slow Fading*: el tiempo de cambio del comportamiento del canal es mucho menor que el T_s .

Por otro lado se definió al ancho de banda de coherencia (W_c) para determinar cómo es la conducta del mismo en el dominio espectral. De esta forma se obtuvo la siguiente clasificación:

- *Flat Fading*: Este desvanecimiento plano se produce cuando el ancho de banda de la señal es mucho menor que W_c .
- *Selective Fading*: Decimos que existe desvanecimiento selectivo en frecuencia cuando el ancho de banda de la señal es mucho mayor que W_c .

A modo de resumen,

TABLA AI.1. Parámetros para caracterizar un canal.

Tipo de canal	Características
Fast Fading	$T_c \ll T_s$
Slow Fading	$T_c \gg T_s$
Flat Fading	$W \ll W_c$
Selective Fading	$W \gg W_c$

Modelado de Rayleigh y Ricean

Definimos al ensanchamiento por Doppler (D_s) y Multi-camino (τ_{\max}) como dos cantidades asociadas a un receptor determinado, en una posición determinada para un tiempo y velocidad dados. Sin embargo nos es de mayor utilidad caracterizar estos parámetros no para una condición determinada sino para un rango de condiciones. Para esta tipificación se requiere el uso de modelos probabilísticos.

Partiendo de un modelo de canal basado en un gran número de caminos dispersos, estadísticamente independientes, y con amplitudes aleatorias que se observa en una ventana de tiempo correspondiente a T_s . La fase del camino i ésimo es $2\pi f_c \tau_i$. Entonces, $f_c \tau_i = d_i / \lambda$, en donde d_i es la distancia recorrida por el camino i ésimo y λ representa la longitud de onda de la señal transmitida. Asumiendo que $d_i \gg \lambda$, es razonable pensar que la fase de cada camino se distribuye de forma uniformemente entre 0 y 2π , y además la misma es independiente en cada uno de los caminos. Por lo que la contribución de cada camino se verá reflejada en $h_i[m]$ como:

$$a_i(m/W) e^{-j2\pi f_c \tau_i(m/W)} \text{sinc} [\ell - \tau_i(m/W)W] \quad \text{ec.A.13}$$

Cada “tap” (peso de $h_l[m]$), se conforma como una suma de múltiples variables aleatorias independientes. Dado que todas estas variables presentan una varianza finita y asumimos que provienen de múltiples fuentes independientes (condición previamente mencionada tras suponer que $d_i \gg \lambda$) entonces en virtud del teorema Central del Límite podemos modelar este efecto como un proceso Gaussiano de media 0 y una varianza σ . Con esta aseveración de que la distribución de probabilidad para $h_l[m]$ es Gaussiana, y recordando que $h_l[m]$ es un valor complejo, sabemos que $|h_l[m]|$ presentará una distribución de Rayleigh con densidad:

$$\frac{x}{\sigma_\ell^2} \exp \left\{ \frac{-x^2}{2\sigma_\ell^2} \right\}, \quad x \geq 0 \quad \text{ec.A.14}$$

Mientras que su magnitud cuadrada $|h_l[m]|^2$ presenta la siguiente función de densidad de probabilidad,

$$\frac{1}{\sigma_\ell^2} \exp \left\{ \frac{-x}{\sigma_\ell^2} \right\}, \quad x \geq 0 \quad \text{ec.A.15}$$

Este modelo se denomina desvanecimiento de Rayleigh. Es muy utilizado para modelar mecanismos de dispersión en los que hay muchos reflectores pequeños, aunque en la práctica se utiliza por su simplicidad y buen ajuste para modelar casi todos los fenómenos relacionados a variaciones de magnitud.

Existe otro modelo alternativo que se utiliza cuando existe un camino con Línea de Vista seguido por múltiples caminos dispersos independientes, que no poseen línea de vista. Es condición conocer o poder estimar la magnitud del camino LOS. En este caso $h_l[m]$ puede ser modelado:

$$h_l[m] = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \sigma_\ell e^{j\theta} + \sqrt{\frac{1}{\kappa + 1}} \mathcal{CN}(0, \sigma_\ell^2) \quad \text{ec.A.16}$$

El primer término corresponde al camino con línea de vista, el que llega al receptor con una distribución uniforme de la fase θ . El segundo término se corresponde al agregado de los numerosos caminos reflejados y dispersos, con una fase independiente de θ . El parámetro κ (llamado Factor K) denota la relación de energía que existe entre el camino LOS y los múltiples caminos que llegan (NLOS); el aumento de κ vuelve más determinístico el comportamiento del canal. La magnitud de esta variable aleatoria posee una distribución de Rician.

La Figura A.6 representa la distribución de probabilidad de Rician en función del coeficiente κ . Se puede apreciar que cuando $\kappa > 0$ la función tiende a asemejarse a la distribución de Rayleigh, mientras que para $\kappa > 10$ esta distribución se asemeja a una distribución Gaussiana.

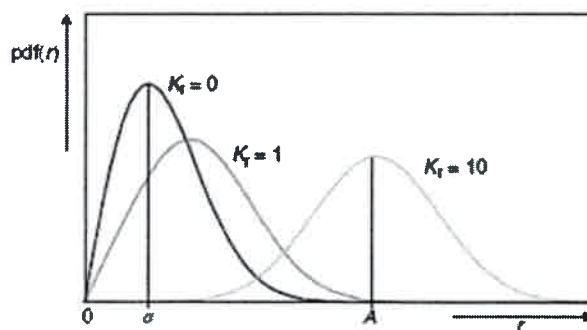


Figura A.6. Distribución de probabilidad de Ricean en función del coeficiente k .

Modelos de Canales aplicados a tecnologías inalámbricas de 4ta generación

Para describir un sistema WiMAX, generalmente son usados dos modelos empíricos: el modelo de canal SUI, el cual es usado para la simulación de los sistemas WiMAX fijo (IEEE802.16-2004); el modelo de canal ITU-R, el cual fue desarrollado de acuerdo a la recomendación ITU-R M.1225, es usado para la simulación de los sistemas WiMAX Móvil (IEEE802.16e). Este último modelo de canal, inicialmente desarrollado para las tecnologías IMT-2000, es usado para modelar los sistemas WiMAX Móvil dado que adopto esta tecnología en noviembre de 2007 como una de las tecnologías IMT-2000. El modelo de canal de banda ancha ITU es descrito en base a un modelo de líneas de retardos (*tapped delay line*), con un número máximo de 6 *taps*. En [88] se especifican 3 ambientes diferentes de prueba: interior, pedestre y vehicular, especifica dos diferentes perfiles de retardo extendido para cada uno de los ambientes de prueba; perfil de retardo extendido bajo (se denota con A), retardo extendido RMS de hasta 100 ns; perfil de retardo extendido medio (se denota con B), retardo extendido RMS de unos cientos de nano segundos.

Sin embargo existen modelos más recientes que han sido validados por un sin número de trabajos y logran ajustarse mejor para entornos urbanos. A continuación se enumeran los más importantes:

- SUI
- TS36942 [86]
- TS25814 [87].
- COST-231:
 - para micro-celdas COST231-Walfish-Ikegami
 - para macro-celdas COST231-Hata

U. N. R. C.
Biblioteca Central

73221



73221